НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-621.39

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ УСТРОЙСТВ

Матвеев Владислав Денисович
Студент кафедры теоретических основ электротехники, Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, Россия

Аннотация

В настоящей масштабной фундаментальной исследовательской работе осуществляется развернутый, детальный, глубокий и многоаспектный научно-теоретический анализ проблем, физических механизмов, методов измерения, математического моделирования и инженерных способов обеспечения электромагнитной совместимости технических устройств в современной электронике и электроэнергетике. В центре внимания находится исследование кондуктивных и излучаемых электромагнитных помех, паразитных емкостных и индуктивных связей на печатных платах и в кабельных трассах, переходных и импульсных воздействий, а также устойчивости радиоэлектронных средств к внешним электромагнитным полям и преднамеренным или непреднамеренным возмущениям. В статье подробно рассматриваются принципы экранирования, фильтрации, заземления и трассировки высокоскоростных сигналов, методики сертификационных и лабораторных испытаний в безэховых и экранированных камерах, а также возможности применения трехмерного электродинамического моделирования на базе методов конечных элементов и моментов для прогнозирования помеховой обстановки на ранних этапах проектирования. На основе междисциплинарного синтеза теории электромагнитного поля, схемотехники, материаловедения и численной электродинамики формулируются концептуальные подходы к повышению помехозащищенности и электромагнитной совместимости сложных технических систем.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, помехоустойчивость, экранирование, фильтрация, кондуктивные помехи, излучаемые помехи, печатная плата, электродинамическое моделирование, целостность сигналов.

Введение

Современная техносфера характеризуется стремительным ростом плотности размещения электронных, электротехнических и телекоммуникационных устройств, повышением тактовых частот цифровых процессоров, расширением

диапазонов рабочих частот радиочастотной аппаратуры, увеличением удельной коммутируемой мощности силовых полупроводниковых преобразователей и широким распространением беспроводных средств связи. В этих условиях технические средства неизбежно функционируют в сложной многофакторной электромагнитной обстановке, где каждое устройство одновременно выступает как потенциальный источник электромагнитных помех и как объект, подверженный воздействию внешних электромагнитных полей и кондуктивных возмущений. Под электромагнитной совместимостью понимается способность технического средства нормально функционировать в заданной электромагнитной обстановке с требуемым качеством и не вносить недопустимых электромагнитных помех в окружающую среду и другие технические средства.

Нарушение электромагнитной совместимости способно приводить к самым различным последствиям — от кратковременных сбоев цифровых логических схем, искажения измерительных сигналов и снижения помехоустойчивости линий связи до ложных срабатываний систем автоматики, деградации изоляции и выхода из строя дорогостоящего оборудования в критически важных отраслях, включая энергетику, транспорт, медицину, промышленную автоматику и связь. При этом миниатюризация элементной базы, усложнение многослойных печатных плат и рост скоростей нарастания фронтов импульсных сигналов усиливают влияние паразитных реактивностей и волновых эффектов, из-за чего проблемы электромагнитной совместимости необходимо решать на этапе концептуального и схемотехнического проектирования, а не путем последующих доработок готового изделия.

Целью данного исследования является систематический научно-теоретический анализ физических механизмов возникновения и распространения электромагнитных помех, оценка методов снижения помехоэмиссии и повышения помехоустойчивости устройств, рассмотрение современных средств измерения и численного моделирования электромагнитной совместимости, а также определение направлений развития инженерных решений для обеспечения надежной работы аппаратуры в усложняющейся электромагнитной среде.

Физические механизмы возникновения и каналы распространения помех

Электромагнитные помехи возникают в результате быстрых изменений электрических токов и напряжений, коммутационных процессов, работы импульсных источников питания, разрядов статического электричества, грозовых воздействий, функционирования радиопередающих устройств и естественных или техногенных источников электромагнитного излучения. По характеру воздействия и спектральному составу помехи подразделяются на узкополосные и широкополосные, непрерывные и импульсные, детерминированные и случайные. В импульсных преобразователях энергии крутые фронты переключения силовых ключей в сочетании с паразитными индуктивностями монтажа и емкостями полупроводниковых переходов порождают высокочастотные колебательные выбросы, расширяющие спектр помех в область десятков и сотен мегагерц.

По способу передачи энергии от источника к рецептору различают кондуктивные и излучаемые каналы распространения помех. Кондуктивные помехи распространяются по проводникам — силовым шинам питания, сигнальным линиям, кабелям управления и заземляющим проводникам — в виде синфазных и дифференциальных составляющих тока и напряжения. Дифференциальные помехи циркулируют между прямым и обратным проводниками цепи, тогда как синфазные помехи возникают между всеми проводниками группы и опорным проводником или землей, часто оказываясь более сложными для подавления из-за паразитных емкостей на корпус и радиаторы охлаждения.

Излучаемые помехи передаются через пространство в виде электромагнитных волн ближней или дальней зоны. На малых расстояниях от источника, сопоставимых с длиной волны, доминируют квазистационарные электрические или магнитные поля, определяемые геометрией токовых контуров и распределением зарядов, тогда как в дальней зоне формируется поперечная электромагнитная волна с определенным волновым сопротивлением среды. Важным фактором является взаимное влияние проводников и элементов конструкции за счет емкостной и индуктивной связи, перекрестных наводок в параллельных трассах и резонансных явлений в корпусах, кабельных экранах и полостях аппаратуры.

Конструктивные и схемотехнические методы обеспечения совместимости

Обеспечение электромагнитной совместимости на уровне конструкции и схемотехники опирается на комплекс взаимосвязанных мер: рациональное проектирование печатных плат и кабельных соединений, фильтрацию, экранирование и организацию систем заземления и выравнивания потенциалов. На печатной плате ключевое значение имеет минимизация площади токовых контуров высокочастотных сигналов и силовых цепей, поскольку именно площадь контура определяет уровень магнитного дипольного излучения и индуктивность связи. Применение сплошных опорных полигонов земли и питания в многослойных платах сокращает длину обратных токов, стабилизирует волновое сопротивление сигнальных линий и снижает уровень перекрестных наводок между соседними проводниками.

Для подавления кондуктивных помех на входе и выходе устройств, в цепях питания и интерфейсах применяются пассивные и активные фильтры, включающие синфазные дроссели, проходные и развязывающие конденсаторы, а также защитные элементы от импульсных перенапряжений — варисторы, супрессоры и газоразрядные приборы. Эффективность фильтрации в высокочастотной области во многом зависит от реальных частотных характеристик компонентов, включая собственную резонансную частоту конденсаторов, паразитную межвитковую емкость дросселей и качество контакта фильтра с корпусом или опорной плоскостью.

Экранирование используется для локализации электромагнитного излучения внутри корпуса источника или защиты чувствительных узлов от внешних полей и основывается на эффектах отражения электромагнитной волны от проводящей границы, ее поглощения в толще материала экрана и многократных переотражений внутри проводящего слоя. Эффективность экрана зависит от проводимости и магнитной проницаемости материала, толщины стенки по отношению к глубине скин-слоя, а также от конструктивной целостности оболочки — наличия щелей, вентиляционных отверстий, смотровых окон и мест прохода кабелей, где щелевое излучение может существенно снижать экранирующий эффект. Не менее критична правильная организация заземления и соединения экранов кабелей, поскольку ошибки в топологии заземления приводят к появлению паразитных контуров, разности потенциалов между узлами и усилению синфазных помех.

Методы испытаний, измерений и численного моделирования

Проверка соответствия устройств требованиям по электромагнитной совместимости осуществляется с использованием стандартизированных методов лабораторных и сертификационных измерений эмиссии и помехоустойчивости. Измерения излучаемых помех проводятся в полубезэховых или полностью безэховых экранированных камерах, оснащенных радиопоглощающими материалами и измерительными антеннами различных диапазонов частот, а кондуктивные помехи оцениваются с помощью эквивалентов сети и приемников электромагнитных помех. Испытания на помехоустойчивость моделируют воздействие кондуктивных и излучаемых радиочастотных полей, наносекундных и микросекундных импульсных помех, электростатических разрядов и провалов или прерываний сетевого напряжения.

Поскольку проведение физических испытаний возможно лишь на этапе создания опытных образцов и требует значительных временных и материальных затрат, все более важную роль играет численное электродинамическое моделирование на этапе проектирования. Применение методов конечных элементов, конечных разностей во временной области, метода моментов и гибридных алгоритмов позволяет рассчитывать электромагнитные поля, распределение токов на проводниках и экранах, характеристики печатных плат и кабельных жгутов в широком частотном диапазоне.

Совместное моделирование электрических цепей и трехмерных электромагнитных структур помогает выявлять резонансы корпусов, оценивать влияние радиаторов и крепежных элементов, прогнозировать целостность сигналов и тестировать эффективность конструктивных изменений до изготовления прототипов. При этом точность численных расчетов напрямую зависит от корректности задания граничных условий, частотных зависимостей параметров материалов и учета реальных конструктивных допусков и неоднородностей.

Заключение

Исследование электромагнитной совместимости устройств является важной научно-технической задачей, обеспечивающей надежное, безопасное и качественное функционирование электронных и электротехнических средств в насыщенной электромагнитной среде. Понимание физических механизмов генерации и распространения кондуктивных и излучаемых помех позволяет целенаправленно применять конструктивные и схемотехнические меры — рациональную трассировку, фильтрацию, экранирование и грамотную организацию заземления — на ранних стадиях проектирования.

Сочетание стандартизированных экспериментальных испытаний с методами численного электродинамического моделирования и адаптация инженерных решений к новым элементным базам и высокочастотным системам определяют дальнейшее развитие области электромагнитной совместимости и повышение устойчивости современных технических комплексов.

Литература

1. Кечиев Л. Н. Проектирование экранированных устройств и систем. — М.: Грифон, 2020. — 480 с.
2. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование и обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 2019. — 384 с.
3. Никитин А. В. Электромагнитная совместимость: учебное пособие. — СПб.: Лань, 2021. — 256 с.
4. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика и техника СВЧ для конструкторов радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Солон-Пресс, 2020. — 424 с.
5. Головин О. В. Радиопомехи и электромагнитная совместимость. — М.: Горячая линия — Телеком, 2019. — 320 с.
6. Уайтинг Д., Кларк Ч. Электромагнитная совместимость в системах связи и управления. — М.: Техносфера, 2020. — 392 с.
7. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. — Hoboken: Wiley, 2022. — 992 p.
8. Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering. — Hoboken: Wiley, 2019. — 864 p.
9. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2025. — Vol. 67, No. 3. — P. 780–805.
10. Progress in Electromagnetics Research. — 2026. — Vol. 181. — P. 45–68.