

# КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

**Грачев Николай Николаевич,**

К.т.н., профессор, Московский институт  
электроники и математики (МИЭМ НИУ ВШЭ)  
nnggrachev@mail.ru

**Лазарев Дмитрий Владимирович,**

К.т.н., доцент, Московский институт  
электроники и математики (МИЭМ НИУ ВШЭ)  
qsk@mail.ru  
05.12.04

**Аннотация:** В статье рассматривается комплексный подход в проектировании РЭС с учетом обеспечения параметров электромагнитной совместимости. Предлагается использование критериального подхода при проектировании РЭС с учетом обеспечения помехоустойчивости и помехозащищенности. Предложенный подход в проектировании позволяет решить задачи применения оптимальных схемотехнических и конструкторских решений при проектировании помехозащищенных РЭС.

**Ключевые слова:** Проектирование РЭС, Помехозащищенность, Помехоустойчивость, Электромагнитная совместимость, Методы проектирования.

## AN INTEGRATED APPROACH TO THE DESIGN OF ANTI-INTERFERENCE ELECTRONIC FUNDS

**Grachev N.N., Lazarev D.V.**

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University).

**Abstract:** This article discusses an integrated approach in designing the REDs taking into account the parameters to ensure electromagnetic compatibility. Criterion is proposed to use the approach in the design of the REDs with a view to ensuring noise immunity. The proposed approach to design allows us to solve the problem of optimal circuit design and design decisions when designing anti-interference RED.

**Keywords:** Design of the REDs, Immunity, EMC, Methods design.

Проблемы, связанные с воздействием электромагнитных излучений, влияющих на работу радиоэлектронных средств, средств управления и контроля, промышленных систем, долгое время решались на уровне примитивной изобретательности, которая в большинстве случаев, с переменным успехом, позволяла решить эти проблемы. Однако практика показала, что одни и те же методы и средства, приносящие успех в одних случаях, оказываются бесполезными в других.

В связи с этим возникает необходимость не только в создании эффективного арсенала средств борьбы с помехами, но и применении системного подхода к проектированию помехозащищенных РЭС. Совершенно недопусти-

мо, что до последнего времени не существует методологии в области проектирования помехозащищенных РЭС, учитывающей организационно – технические, схемотехнические и конструктивные аспекты проектирования. Таким образом, обеспечение ЭМС есть не что иное, как обеспечение качества, которое должно быть задано и обеспечено в ходе разработки или проектирования соответствующих РЭС.

Обеспечение помехозащищенности и помехоустойчивости, как комплексная задача обеспечения качества проектируемых РЭС, в своей постановке предусматривает решение задачи оптимизации. В такой постановке задача чрезвычайно сложна и приходится исследовать ме-

тоды проектирования в целом, в то время как задача помехоустойчивости решается для отдельных блоков и узлов.

Процесс проектирования помехозащищенных РЭС предусматривает анализ требований ТЗ и программы в части обеспечения ЭМС разрабатываемых изделий, определение возможности соответствия параметров ЭМС требованиям НТД (стандартов), расчет основных параметров ЭМС на базе известных или новых моделей, выявления дополнительных требований, не предусмотренных ТЗ но необходимых для функционирования изделия в соответствующей ЭМО. В результате проектирования должен быть сделан выбор наилучшего из рассмотренных вариантов схемно-конструкторских решений в наибольшей степени удовлетворяющего заданным требованиям по обеспечению ЭМС разрабатываемых РЭС.

В представляемых материалах с единых позиций рассматриваются вопросы проектирования помехозащищенных РЭС с введением определяющих критериев помехозащищенности - помехоустойчивости и эффективности защиты для классов аналоговых и цифровых РЭС. Малый объем материалов не позволил полно изложить все вопросы методов проектирования РЭС с учетом ЭМС, изложение материала носит концептуальный характер.

Большинство видов и изделий РЭС относятся к сложным системам, их проектирование характеризуется высокой размерностью задач, наличием большого числа возможных вариантов решения, необходимостью учета разнообразных электромагнитных влияющих факторов и механизмов их воздействия на РЭС.

Проектирование сложных систем основано на блочно-иерархическом подходе. Сущность блочно-иерархического подхода состоит в расчленении представлений об объекте проектирования, включая модели, постановки проектных задач, проектную документацию и т.п. на ряд иерархических уровней. Цель расчленения – замена малого числа проектных задач чрезмерной сложности большим числом задач допустимой сложности. Кроме декомпозиции представлений об объекте по степени детализа-

ции на иерархические уровни, применяют расчленение представлений об объекте по характеру отражаемых свойств (сторон) объекта на ряд аспектов. Аспект, связанный с описанием принципов действия и процессов функционирования объекта, называют функциональным. Если процессы функционирования имеют сложную физическую природу, функциональный аспект может быть разделен на несколько более узких аспектов, каждый из которых связан с описанием физически однородных процессов. К числу основных аспектов представлений о проектируемых РЭС, кроме функционального относятся конструкторский и технологический, связанные соответственно с описаниями конструкций и технологией их изготовления.

В каждом аспекте вводятся свои уровни абстрагирования, функциональном аспекте принято выделять системный (структурный), функционально-логический, схемотехнический и компонентный уровни. На системном уровне в качестве систем фигурируют комплексы, например, радиолокационная станция, система управления движущимся объектом, а в качестве элементов - блоки (устройства) аппаратуры, например процессор, модем, передатчик и т.п. На функционально-логическом уровне эти блоки рассматриваются как системы, состоящие из элементов, в качестве которых выступают функциональные узлы - счетчики, дешифраторы, отдельные триггеры и вентили, усилители модуляторы и др. На схемотехническом уровне функциональные узлы описываются как системы, состоящие из электрорадиоэлементов (компонентов схемы) – транзисторов, чипов, резисторов, конденсаторов и т.п.

На компонентном уровне рассматриваются процессы, имеющие место схемных компонентах.

Конструкторскому аспекту присуща своя иерархия конструктивов, включающая уровни описания элементов несущих конструкций, типовых элементов замены, дискретных компонентов, топологических фрагментов функциональных ячеек и отдельных компонентов в кристаллах интегральных микросхем.

Анализируя конструкторско-технологические аспекты ЭМС следует учитывать их связь со схемотехническими аспектами проектирования РЭС, знание которых во многих случаях необходимо конструктору-технологу. Понимание существа такой связи стало особенно важным, когда начали широко использоваться микроузлы. Комплексный характер проблемы обеспечения ЭМС различных технических средств приводит к еще более тесной связи между конструкторско-технологическими и схемотехническими решениями задачи разработки РЭС [1].

Методология проектирования включает прежде всего описание процесса проектирования с выделением процедур, а также методы проектно-конструкторской деятельности на каждом этапе работ.

Еще когда концепция помехозащищенности лишь вырисовывается в сознании конструктора, он уже уточняет эту концепцию, одновременно учитывая большое множество различных критериев и характеристик. Сложность творческого проектно-конструкторского процесса как явления приводит исследователя к выделению различных этапов и операций которые описывают процесс с различной полнотой. В различных подходах, отраженных в многочисленных публикациях по методологии инженерного проектирования [2] составляющие этапа, либо: изобретательство, инженерный анализ и принятие решений; либо оценка осуществимости, эскизное проектирование и рабочее конструирование; либо, проектирование, концептирование и конструирование. Творческая деятельность конструктора может быть расчленена на следующие операции: выбор конструкции, эскизное компонование, техническое компонование, рабочее проектирование.

Каждый из этапов подразделяется на операции синтеза, анализа и принятия решений.

Задачи синтеза конструкций РЭС значительно сложнее и менее разработаны, чем задачи анализа конструкций. Поэтому данную задачу обычно решают методом последовательных приближений по стадиям.

Большое число разнообразных физических эффектов, учет которых необходим при анализе и синтезе конструкции помехозащищенных РЭС - главные причины использования разнообразных методов анализа и синтеза конструкций РЭС, как правило, не увязанных между собой.

Чаще всего задачу сводят к задаче оптимизации /по минимуму или максимуму/ обобщенной целевой функции конструкции РЭА в виде надежности, стоимости, объема, массы, помехозащищенности и т.д., либо к использованию методов математической физики, прилагаемых к обобщенным физическим моделям конструкций помехозащищенных РЭС.

Минимизация или максимизация целевой функции может быть выполнена дифференцированием (поиском экстремума), методом множителей

Лагранжа, численными методами, линейным программированием и приемами вариационного исчисления.

При оптимизации путем дифференцирования решается система уравнений, полученных приравниванием нулю производных от целевой функции по каждому из параметров. Для упрощения решения следует учесть до начала дифференцирования функциональные ограничения, чтобы уменьшить число параметров.

При оптимизации по методу множителей Лагранжа последовательно дифференцируется целевая функция и функциональные ограничения.

Полученные уравнения умножаются на множители и решаются совместно с исходными. При большом числе параметров необходимо использовать ЭВМ.

При численных методах оптимизации используют таблицы и графики, методы поочередного одномерного поиска, а затем более сложные методы наискорейшего спуска.

Для оптимизации конструкции с распределенными параметрами необходимо использовать вариационное исчисление, ибо все предыдущие методы пригодны только для конструкций с сосредоточенными параметрами.

Во всех этих случаях в качестве исходных могут быть использованы параметры, полученные на основе практического опыта, рекомендаций, объединение которых выполняется с помощью различных практических методик, РТМ и т.п., физическими или статистическими способами (вероятностная теория надежности РЭА).

Для того, чтобы упростить задачу анализа и синтеза конструкций РЭА, следует использовать физические теории и рационально выбирать исходные (определяющие) конструкторские параметры.

Методология их выбора должна базироваться на общей теории алгебраических систем и теории подобия и моделирования, что позволяет дать наиболее экономное, но полное и корректное описание.

При разработке методов обеспечения ЭМС различается 3 основных направления [3]. Одно из них объединяет методы воздействия на источники помех в самом источнике возникновения. Второе направление объединяет методы, уменьшающие возможности проникновения любых помех путем устранения паразитных связей РЭС с источниками помех. Третье направление основано на использовании каких-либо различий (спектральных, временных, фазовых и т.д.) рабочего сигнала системы и помехи и представляет собой методы повышения помехоустойчивости системы. Если различия между полезным сигналом и помехой отсутствуют или неизвестны, то выделить полезный сигнал не представляется возможным. Первых два направления представляют собой методы защиты РЭС от помех. Применяя методы защиты не всегда удается в необходимой степени предотвратить проникновение паразитных сигналов.

Рассматривая конкретные устройства и РЭС сигнал на входе узла может быть представлен как сумма полезного сигнала  $e(t)$  и помехи  $z(t)$ , если  $X(t) = e(t) + z(t)$ , то помеха  $z(t)$  называется аддитивной, а если как произведение  $X(t) = e(t)z(t)$ , то помеха  $z(t)$  называется мультипликативной. Методы, уменьшающие воздействие аддитивной помехи на качест-

во функционирования относятся к третьему направлению.

Для оценки качества РЭС в отношении ЭМС представляется использование понятия помехозащищенности [4]. Помехозащищенность некоторого радиоэлектронного средства определяется следующим образом:

$$P = K P_{\text{э}} \quad (1)$$

где  $P$  – помехозащищенность радиоэлектронного средства (системы);

$P_{\text{э}}$  – эффективность методов повышения помехоустойчивости;

$K$  – параметр характеризующий эффективность методов защиты.

Повышать помехозащищенность РЭС можно, увеличивая либо эффективность защиты  $K$ , либо помехоустойчивость, либо и то и другое.

Параметр  $P_{\text{э}}$  обеспечивается схемотехническими методами, параметр

$K$  – конструкторско-технологическими.

Можно классифицировать обеспечение ЭМС аналоговых узлов системотехническими, схемотехническими и конструкторско-технологическими методами. К системотехническим методам относятся передача аналоговой информации в цифровой форме и кодирование ее с помощью помехозащищенных кодов, к схемотехническим – увеличение помехозащищенности схем (исключение необоснованного использования элементов с завышенной рабочей частотой) применение схем на основе дифференциальных усилителей, малошумящих элементов, гальваническая развязка цепей, подавление помех с помощью фильтров и др. Однако, выделение схемотехнических методов в рассмотренной классификации органически связано с вопросами конструирования и технологии изготовления элементов и узлов, а также с построением электрических схем устройств при использовании системотехнических методов.

Наличие экспериментальных или расчетных характеристик помех в цепях РЭС позволяет каждому разработчику подсистемы, устройства, блока оценить правильность требо-

ваний, предъявляемых к помехоустойчивости РЭС, (а также требований к помехозащищенности конструктивными средствами). После получения сведений о помехах, действующих в цепях РЭС, становится необходимым сформулировать критерии, позволяющие оценить помехозащищенность РЭС к воздействию помех.

В качестве таких критериев оценки можно использовать различные критерии, включая “искусственные”, например наличие или отсутствие сбоев в работе РЭС.

Искусственный критерий позволяет определить посредством решения обратной задачи – от знания реакции аппаратуры к определению уровней помех в цепях РЭС – допустимые значения опасных токов и напряжений в цепях РЭС и в конечном счете допустимые уровни ЭМП для рассматриваемой аппаратуры. Допустимыми значениями уровней ЭМП, напряжений и токов в цепях РЭС условно считают такие максимальные значения, при которых в аппаратуре не требуется применения каких либо специальных мер защиты. Одним из основных методов, широко применяемых в практике определения помехозащищенности РЭС к воздействию ЭМП, является моделирование.

Общая концепция методологии проектирования РЭС основана на системном подходе к решению задачи обеспечения ЭМС, т.е. на выявлении всех факторов, влияющих на ЭМС при совместном функционировании разрабатываемых РЭС с другими средствами заданной системы, определении причин возникновения факторов и установлении связей и взаимодействия между ними.

Системный подход в проектировании РЭС приводит к комплексности решения задачи обеспечения ЭМС на различных уровнях в двух основных направлениях – повышении помехозащищенности и помехоустойчивости рецепторов и снижении энергии помех в их источниках и среде распространения. При такой постановке введение критериев характеризующих ЭМС является необходимым. Существование определяемого критерия помехозащищенности задаваемого определяю-

щими критериями  $K$  и  $P_u$  представляет собой критериальное уравнение характеризующее качество проектируемых РЭС с позиций ЭМС. При этом критериями могут быть как числовые значения, так и некоторые функциональные зависимости.

Рассматривая многообразие РЭС можно с достаточной степенью допущений выделить два основных класса – аналоговые РЭС и цифровые. Механизм искажения и затухания сигналов, а также появление помех в аналоговых узлах такой же, как и в цифровых узлах.

Однако, электрически длинные линии имеют место в аналоговых узлах лишь для диапазона СВЧ, а в диапазоне ВЧ преобладают лишь электрически короткие. Процессы, происходящие в аналоговых РЭС, как правило, описываются с помощью сигналов представленных в частотной области (характеристика спектральной плотности). Это анализ частотных свойств РЭС, представленных многополюсниками со своими передаточными характеристиками. В цифровых узлах основные процессы, происходящие в них, описываются сигналами во временной области (время переключения, задержка, переотражения и т.д.). В связи с этим при выборе критериев ЭМС для аналоговых и цифровых РЭС целесообразно использовать частотные и временные характеристики.

Любое математическое описание характеристик помехозащищенности является упрощением реальной ситуации (гомоморфизм). Такое упрощение может быть достигнуто путем сосредоточения внимания наиболее важных обстоятельствах (зависимостях) и исключения остальных, для данного исследования несущественных. Так, в спектральном представлении внимание сосредоточено на частотном составе сигнала, а временные зависимости исключены. Ясно, что отношение между параметром сигналом-оригиналом и его гомоморфными моделями не являются равноправными (как при изоморфизме), т.к. они не могут меняться местами (превращаться из модели в оригинал для других). Однако, из-за этого упрощения, отбрасывания несущественных сторон, удастся глубже вникнуть в исследуемую

сторону явления, используя адекватный математический аппарат. При этом нужно четко оценивать границы применимости принятой модели.

Анализируя общность проблем по обеспечению помехозащищенности как для цифровых, так и для аналоговых устройств, является целесообразным введение критериальных функций для аналоговых РЭС, как характеризующих помехозащищенность в частотной области,

$$P(j\omega) = K(j\omega) P_u(j\omega) \quad (2)$$

для цифровых РЭС – во временной

$$P(t) = K(t) P_u(t) \quad (3)$$

Функции  $P(j\omega)$  и  $P_u(t)$  характеризуют потенциальную помехоустойчивость аналоговых и цифровых РЭС,  $K(j\omega)$  и  $K(t)$  – эффективность средств защиты со своими частотно-временными характеристиками. Функции  $K(j\omega)$  и  $K(t)$  ( $P_u(j\omega)$  и  $P_u(t)$ ) связаны между собой

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (4)$$

$$K(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Причины возникновения импульсных помех в цифровых устройствах обусловлены отражениями в сигнальных линиях связи от несогласованных нагрузок и неоднородностей, искажением формы сигнала в линиях связи, соствязанием сигналов в логических цепях, искажением формы сигнала в логической схеме и др.

Помехоустойчивость  $P_u(t)$  цифровых узлов обусловлена физическими процессами происходящими в кристаллах, заданным быстродействием, технологией изготовления, зависимостью импульсных параметров от напряжения питания, температуры, нагрузочной способности.

Эффективность методов защиты  $K$  обусловлена качеством конструирования межсоединений, монтажа и компоновки ИС в устройстве, обеспечивающие малые отражения логических сигналов от несогласованных нагрузок и неоднородностей, малым затуханием и искажением полезного сигнала при включении распределенных вдоль линии нагрузок, уменьшением перекрестных помех и паразитных связей между схемами через цепи питания и заземления, уменьшением помех от внешних электромагнитных полей. На этапе технического проектирования анализируются искажения сигналов для оценки помехозащищенности элементов и выполнения требований по быстродействию при реальном конструктивном воплощении схемотехнических решений.

### Список литературы

1. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь. 1984. – 336 с.
2. Прохоров Ф.Ф. Конструктор и ЭВМ. – Машиностроение, 1982. – 272 с.
3. Михайлов Е.В. Помехозащищенность информационно-измерительных систем.- М.: Энергия, 1975. -104.
4. Левин Г.А. Помехозащищенность. – В кн.: Энциклопедия современной техники. Автоматизация производства и промышленная электроника. – М.: Советская энциклопедия, 1964, т.3 с.45-56.