

УДК 621.396.6-027.31

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

ТИТОВИЧ Н. А., МУРАШКИНА З. Н.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*E-mail: [nikolai.titovich@gmail.com](mailto:nikolai.titovich@gmail.com), [kafirt1@bsuir.by](mailto:kafirt1@bsuir.by)*

**Аннотация.** Рассмотрены особенности проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), подверженной воздействию электромагнитных помех (ЭМП) с учетом восприимчивости полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных микросхем (ИМС). В качестве альтернативного критерия оценки восприимчивости ИМС предложено выбирать их по минимальным уровням электромагнитного излучения. При проектировании экранов для защиты РЭА от ЭМП важно учитывать частоты, на которых излучения ИМС максимальны.

**Abstract.** The design features of radio-electronic equipment (REA) exposed to electromagnetic interference (EMI) taking into account the susceptibility of semiconductor devices (PP) and integrated circuits (IC) are considered. As an alternative criterion for assessing the susceptibility of ICS, it is proposed to choose them according to the minimum levels of electromagnetic radiation. When designing screens to protect REA from EMF, it is important to take into account the frequencies at which the IC radiation is maximum.

### Введение

Современные подходы к конструированию РЭА предполагают решение вопросов электромагнитной совместимости (ЭМС) уже на стадии выбора элементной базы, разработки печатных плат отдельных блоков, проектирования электромагнитных экранов и помехоподавляющих фильтров. Исследования показали, что при воздействии ЭМП наиболее вероятны обратимые трудно прогнозируемые сбои в работе РЭА, которые наступают при гораздо меньших в сравнении с необратимыми отказами уровнях помех и цена которых весьма велика. Поэтому тема исследования влияния ЭМП на работоспособность цифровых устройств и, в частности, ИМС получила сегодня новый импульс развития.

### Учет восприимчивости ПП и ИМС к воздействию ЭМП.

Исследования восприимчивости ПП и ИМС начались в 80-х годах прошлого столетия. К этому времени была накоплена статистика по обратимым отказам вычислительной техники и другой РЭА в случаях применения средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). По результатам исследований появились специальные отчеты и справочные пособия, посвященные анализу восприимчивости ПП и ИМС к воздействию ВЧ и СВЧ ЭМП. В связи с большим объемом исследований в справочниках приводились данные испытаний в основном типовых элементов, они содержали подробные методики проведения измерений, рекомендации по выбору критериев оценки и построению лабораторных макетов. Данные рекомендации интересовали в основном разработчиков специальной аппаратуры. К концу прошлого столетия была накоплена определенная статистика по отказам не только военной, но и промышленной, и бытовой аппаратуры под воздействием ЭМП. Поэтому в каждой крупной компании, производящей микроэлектронную продукцию, начали проводиться испытания по данной тематике, разрабатывались рекомендации по их проведению. В результате в начале нынешнего столетия были разработан стандарт по измерению электромагнитной устойчивости интегральных схем МЭК 62132 [1, 2]. Стандарт содержит четыре метода проведения испытаний, наиболее популярными из них являются метод измерения с помощью ТЕМ-камеры (МЭК 62132-2) [1] и метод прямого введения мощности (МЭК 62132-4) [2]. Первый метод более аппаратуроемкий и дорогой, основан на

измерении уровней напряженности воздействующего электромагнитного поля и предназначен в основном для испытания отдельных блоков и узлов. Второй удобен для исследования восприимчивости отдельных ПП и ИМС, позволяет измерять уровни напряжений и мощностей СВЧ помех, воздействующих непосредственно на выводы ПП и ИМС.

Организация испытаний на восприимчивость ПП и ИМС к воздействию ЭМП требует высокой квалификации инженеров в области полупроводниковой электроники, электродинамики и ЭМС. Для организации испытательных лабораторий необходимы не только мощные генераторы и усилители широкого частотного диапазона, но и оборудование специальных ТЕМ-камер, сложная измерительная аппаратура, разработка специальных тестовых плат, разъемов. Поэтому все более популярным становится расчетный метод оценки восприимчивости. Основной проблемой здесь является отсутствие точных данных о параметрах ИМС, которые разработчики, как правило, не представляют.

Исследования восприимчивости ПП и ИМС к воздействию радиопомех показали, что при измерениях и расчетах имеет смысл использовать методики испытаний и фрагменты моделей электромагнитного излучения той же микросхемы. В основе этого довода лежит принцип взаимности, который применительно к интегральным схемам заключается в том, что наибольшая восприимчивость ИМС к воздействию ЭМП наблюдается на частотах с максимальными уровнями паразитных излучений. Поэтому при выборе метода оценки восприимчивости целесообразно изучить стандарты, регламентирующие измерения уровней помех. Стандарт IEC 61967 [3,4] претендует на роль общепотребительного стандарта, определяющего характеристики помех, излучаемых интегральными схемами любого типа в диапазоне 150 кГц...1 ГГц. Наиболее удобными для исследования ИМС являются метод ТЕМ-камеры и метод прямого соединения 1 Ом/150 Ом.

Измерение излучаемых помех по стандарту IEC 61967-2 [3] используется для определения уровня электромагнитного излучения в окружающую среду, создаваемого внутренней структурой и выводной рамкой ИМС. ТЕМ-камера представляет собой клинообразный коаксиальный волновод, состоящий из плоского внутреннего проводника (перегородки) и внешнего коаксиального проводника (экрана), и в данном случае используется в качестве экранированной приёмной антенны. Указанный метод измерений электромагнитного излучения требует разработки специальной тестовой платы для испытуемой ИМС. Метод прямого соединения [4] может быть использован для измерения уровня помех, излучаемых интегральными схемами, с высоким разрешением и в широком диапазоне частот. При данном методе результаты могут быть получены как для ИМС в целом, так и выборочно для их выводов. Следует отметить, что стандарт IEC 61967-2 требует меньших аппаратных затрат и многие ведущие мировые производители микроэлектронной продукции применяют его для оценки уровней электромагнитных излучений своей продукции и размещают эту информацию и методики проведения испытаний в своих справочниках. На рисунке 1 представлены спектры узкополосной и широкополосной помехи, генерируемой силовой ИМС, выпускаемой компанией Infineon, измеренные с помощью 150-омного пробника напряжения по методу прямого соединения [5].

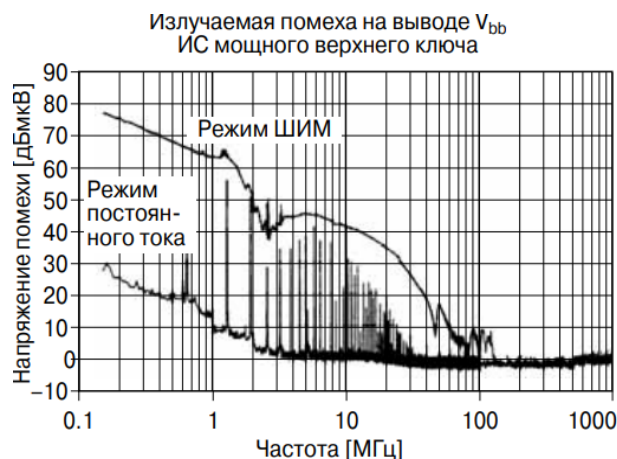


Рис.1. Спектры узкополосной и широкополосной помехи, генерируемой силовой ИС.

Таким образом в распоряжении разработчика РЭА, работающей в сложной помеховой обстановке, сегодня появился серьезный инструмент, заключающийся в выборе менее восприимчивой к воздействию ЭМП элементной базы. При отсутствии возможности испытать ПП и ИМС по данному критерию инженер может использовать данные производителей об уровнях паразитных излучений.

### Особенности проектирования экранов при воздействии преднамеренных ЭМП.

По характеру воздействия на ИМС частотный диапазон ЭМП можно разделить на три области. В области, где частота ВЧ помехи  $f_n$  ниже граничной рабочей частоты  $f_{гр}$  микросхемы, происходят функциональные сбои, т.е. помеха воспринимается как рабочий сигнал, если уровень ее соответствует порогу переключения. Во второй области имеют место «перемежающиеся» сбои. Здесь  $f_n$  уже превышает  $f_{гр}$  и поэтому времени воздействия помехи не всегда достаточно для переключения ИМС, а результат воздействия ЭМП во многом зависит от соотношения фаз сигнала и помехи. Для переключения ИМС воздействующая помеха должна иметь определенную длительность. Поэтому на частоте  $f_n$  близкой к  $f_{гр}$ , переключение происходит при уровнях выше порога переключения. В третьей области имеют место сбои, обусловленные изменением параметров ИМС за счет детектирования огибающих ЭМП, а также за счет паразитных резонансных явлений на некоторых частотах. Работа р-п-переходов транзисторов логических элементов (ЛЭ) в качестве детекторов приводит к появлению на них дополнительных напряжений смещения и к изменению всех параметров: уровней логического нуля и единицы, времени задержки распространения при включении и выключении. В этой области, как видно из рисунка 2, ВЧ напряжение, приводящее к сбою, увеличивается с ростом частоты.

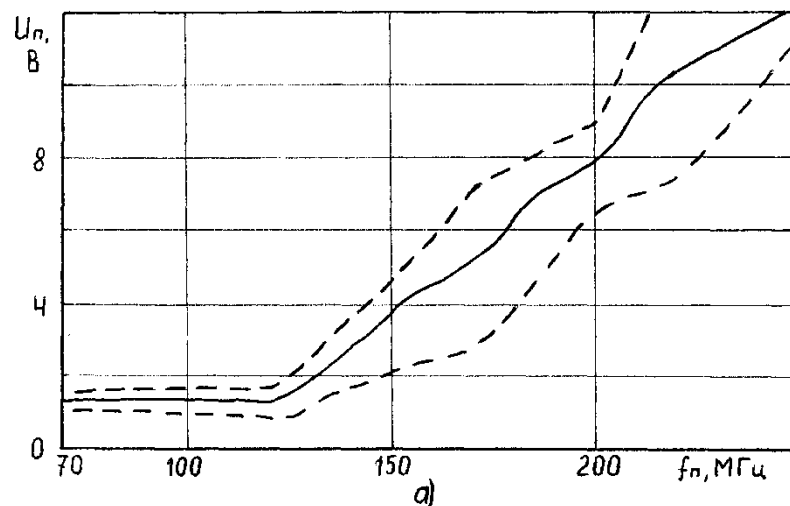


Рис.2. Зависимость порога восприимчивости ИМС K555JA3, определенного в единицах напряжения от частоты радиопомехи, воздействующей на вход.

Значения  $f_{гр}$  не всегда приводятся в справочниках по ИМС. Они отличаются для различных типов и серий ИМС и составляют порядка 15-20 МГц для ЛЭ серии 155, 30-35 МГц для 531, 25-30 МГц для 1533, 25-30 МГц для 1554. Для определения  $f_{гр}$  можно включить три инвертирующих ЛЭ в схему кольцевого генератора, который за счет суммарного времени задержки в элементах будет работать на частоте, близкой к  $f_{гр}$ . [6]. Исследования показали, что области «перемежающихся» сбоев при  $f_n$  близкой к  $f_{гр}$  могут происходить частые функциональные переключения ЛЭ, что приведет к значительному увеличению потребляемого им тока, быстрому нагреву корпуса микросхемы, изменению выше перечисленных параметров и в конечном итоге выводу ИМС из строя. Особенно критичны к такому режиму КМОП схемы.

Следует также учесть, что основные паразитные излучения ИМС наблюдаются на частоте их переключения, близких к  $f_{гр}$ . Эту особенность можно использовать при постановке преднамеренных помех для временного вывода из строя различного радиоэлектронного оборудования, например, цифровых систем обработки радиолокационных изображений. Если противнику известны особенности схемного построения и элементная база РЭА, то вместо постановки широкополосных ЭМП на нее

можно воздействовать узкополосной помехой с частотой близкой к граничной частоте переключения ЛЭ. Отказ в работе аппаратуры наступит, как отмечалось выше, по причине значительного увеличения потребляемого ИМС тока. Такой метод ведения РЭБ дешевле, но предполагает наличие информации о схемном построении РЭА противника.

Поэтому при проектировании аппаратуры следует уделять внимание снижению уровней ее излучения за счет переключений непосредственно ИМС, по спектру которого можно определить наиболее критичные с точки зрения действия преднамеренных помех частоты. При этом основным инструментом обеспечения помехоустойчивости является грамотное построение экранов. Как видно из рисунка 3 «слабым местом» обычных металлических экранов является конструкция отверстий для вентиляции, индикации и др. На определенных частотах коэффициент экранирования значительно уменьшается. Очевидно, что эти частоты не должны быть близкими к граничной рабочей частоте элементов схемы. В противном случае электромагнитные излучения через отверстия для вентиляции и индикации будут максимальными и в соответствии с принципом взаимности через экран будут проникать максимальные уровни воздействующей внешней ЭМП.

В случае, если все же необходимо проектировать отверстие строго определенного диаметра (в частности, для вентиляции или ввода диэлектрических кабелей), можно использовать запердельный волновод [7]. Это полая трубка из проводящего материала, длина которой значительно превышает диаметр. Свойства данной конструкции частотно зависимы. Электромагнитные волны ниже определенной частоты, называемой частотой среза, будут распространяться с очень большим затуханием. Значительного эффекта в этом случае также позволяет достичь применение трикотажной технологии для изготовления электромагнитных экранов, создание гибких электромагнитных экранов, экранов с вакуумным осаждением металлов на поверхность пористых органических материалов [8].

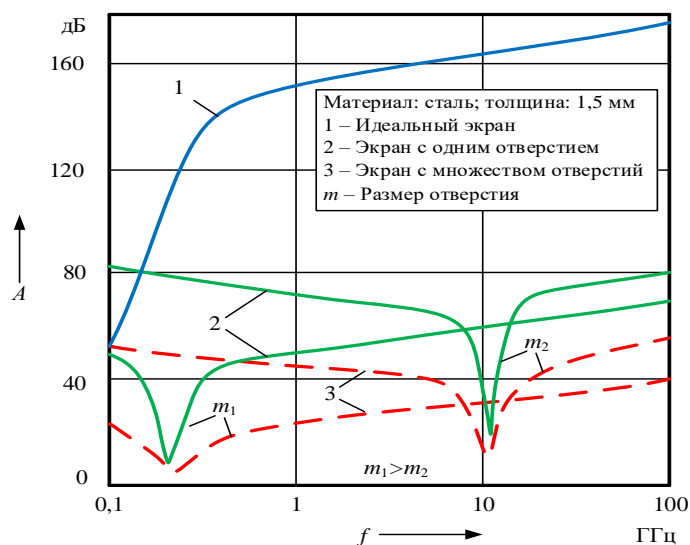


Рис.3. Сравнительный анализ эффективности экранов.

### Заключение

При разработке современной РЭА, работающей в сложной помеховой обстановке, инженер обязан учитывать информацию о восприимчивости ПП и ИМС к воздействию ЭМП. Это позволяет значительно снизить затраты на обеспечение ЭМС в целом, уменьшить габариты и вес аппаратуры. К сожалению большинство производителей микросхем испытаний по такому критерию не проводят и данных о восприимчивости не предоставляют. Разработанные же стандарты по измерению помехоустойчивости достаточно сложны и аппаратуроемки. Исследования показали, что в качестве альтернативного критерия оценки восприимчивости ИМС можно использовать данные об уровнях их электромагнитных излучений. В основе этого довода лежит принцип взаимности, который

применительно к интегральным схемам заключается в том, что наибольшая восприимчивость ИМС к воздействию ЭМП наблюдается на частотах с максимальными уровнями их паразитных излучений. Такие данные можно получить, как от разработчиков элементной базы, так и путем измерений.

Накапливаемый опыт проектирования РЭА с учетом восприимчивости ПП и ИМС к воздействию ВЧ и СВЧ помех позволяет одновременно совершенствовать и методы защиты её, обеспечивая ЭМС с меньшими затратами. Так при проектировании электромагнитных экранов желательно снижать уровни излучений РЭА на частотах, близких к граничным рабочим частотам используемых ИМС. Резонансные частоты отверстий для вентиляции и индикации должны быть удалены от области  $f_{гр}$ . В противном случае значительно увеличивается вероятность возникновения сбоев на этих частотах при воздействии средств РЭБ, что обусловлено не только изменением параметров ИМС за счет детектирования огибающей ЭМП, но и значительным возрастанием потребляемого тока при длительной работе ЛЭ в режиме переключения.

### Список использованных источников

1. Стандарт IEC62132-2(2010). Интегральные схемы. Измерение стойкости к электромагнитным помехам, от 150 kHz до 1 GHz. Часть 2. Измерение стойкости к излученным помехам. Ячейка TEM и метод с использованием широкополосной TEM.
2. Стандарт IEC62132-4(2006). Интегральные схемы. Измерение стойкости к электромагнитным помехам, от 150 kHz до 1 GHz. Метод прямой радиочастотной подпитки.
3. Стандарт IEC 61967-2(2005). [Интегральные схемы. Измерение электромагнитных излучений в диапазоне от 150 кГц до 1 ГГц. Часть 2. Измерение излученных излучений. Метод с применением TEM элементов и широкополосных TEM элементов.](#)
4. Стандарт IEC 61967-4(2006) Схемы интегральные. Измерение электромагнитного излучения в диапазоне от 150 кГц до 1 ГГц. Часть 4. Измерение кондуктивных помех методом прямого соединения 1 Ом/150 Ом.
5. Infineon. Электромагнитная совместимость интегральных микросхем, 2010 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.symmetron.ru/suppliers/infineon/files/pdf/infineon/INF13.pdf>.
6. Титович, Н. А. Исследование влияния радиопомех на динамические параметры логических элементов / Титович Н. А. // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС = Instrumentation and control systems for NPP and TPP : материалы II Международной научно-технической конференции, Минск, 27-28 апреля 2021 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2021. – С. 233–238.
7. Ивко А.М. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры, как метод обеспечения электромагнитной совместимости / Силовая электроника, №4, 2015. с.24-27.
8. Лыньков Л.М. Новые материалы для электромагнитного экранирования/ Л.М. Лыньков, В.А. Богуш, Т.В. Борботько, Е.А. Украинец, Н.В.Колбун //доклады БГУИР– Минск, 2004. –С.152 - 167.