

УДК 621.3.049.7.029

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ИМПУЛЬСНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. Ключник¹, Ю. А. Пирогов², А. В. Солодов¹

¹Московский радиотехнический институт РАН

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Центр магнитной томографии и спектроскопии

Получена 21 июля 2010 г.

Аннотация. Представлен анализ ключевых моментов в методике исследований интегральных микросхем на стойкость в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. Проведено сравнение условий экспериментальных исследований с реальными условиями облучения ИМС, расположенных на печатных платах радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: методика, стойкость, повреждение, интегральные микросхемы, радиоимпульс.

Введение

Нарушение работоспособности изделий микроэлектроники зачастую связано с сильными импульсными электрическими перегрузками в цепях электронных систем. В основе таких нарушений, как правило, лежат отказы элементной базы – аналоговых или цифровых микросхем, диодов и т.д. Повышение стойкости элементной базы микроэлектроники (в том числе интегральных микросхем (ИМС), которые являются основными структурными элементами) к внешним воздействиям становится особенно актуальным в связи с разработками мощных источников радиочастотного излучения (случайные и преднамеренные воздействия, «электронный терроризм»). Особенно остро этот вопрос стоит в случае «ответственных» устройств военной и гражданской техники, от нормальной работы которых зависит жизнь людей (датчики на

АЭС, пилотажно-навигационное оборудование самолетов, кораблей и т.п.) или нарушение работы которых может приводить к крупным материальным потерям (устройства хранения информации, ЭВМ и пр.).

Требования по электромагнитной стойкости микросхем влияют на конструирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Естественно, перед разработчиками возникает задача свести к минимуму нежелательные последствия, обусловленные действием внешнего радиоизлучения, путем рационального выбора элементной базы РЭА и применения специальных схемотехнических, технологических и конструктивных решений. При этом эффективность принимаемых мер тем выше, чем на более ранних этапах разработки РЭА они реализуются.

В этой связи проведение исследования стойкости элементной базы микроэлектроники к интенсивным электромагнитным импульсам излучения как на уровне конструктивного выполнения изделий, так и на уровне логики их работы в составе РЭА является актуальным.

Испытания по стойкости необходимы для исследований физических механизмов воздействия радиоизлучения на микросхемы и анализа нарушений их работоспособности в электромагнитных полях радиоизлучения. Результаты анализа позволяют разработать методы качественных и количественных оценок стойкости элементной базы микроэлектроники к интенсивному радиоизлучению.

Общая универсальная методика проведения испытаний на стойкость ИМС в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения необходима для качественного руководства разработкой программ защиты от мощного радиоизлучения. Создание методики сформирует гарантированные, достоверные условия проведения испытаний ИМС и позволит получать результаты, которые могут эффективно использоваться при оценке степени воздействия радиоизлучения. Предшествующие работы [1-8] в области стойкости ИМС к воздействию мощных импульсов радиоизлучения многое

теряли из-за нестандартных схем и условий испытаний, неопределенности вопросов контроля стойкости и регистрации результатов.

Одним из направлений данной работы является разработка и введение в действие стандартной методики по оценке степени стойкости различных типов ИМС к воздействию мощных импульсов радиоизлучения.

Настоящая работа посвящена анализу ключевых моментов в методике проведения исследований физических механизмов и эффектов, приводящих к нарушению работоспособности и стойкости интегральных микросхем в интенсивных электромагнитных полях импульсного радиоизлучения.

На наш взгляд ключевыми моментами методики, которые мы собираемся рассмотреть, являются объект исследования, постановка задач исследования, условия и порядок проведения испытаний.

В основном будем говорить о цифровых ИМС, особенность которых связана с тем, что полоса частот ИМС существенно отличается от несущей частоты радиоимпульса, однако анализируемые методические аспекты в равной степени относятся и к другим современным ИМС.

Объект исследования

Объектом исследования являются ИМС, входящие в состав РЭА. Для выяснения влияния технологических, схемотехнических, конструктивных особенностей и степени интеграции, исследования необходимо проводить с разными типами и сериями ИМС.

В составе РЭА микросхемы располагаются на платах, на которых имеются токоведущие линии разных длин и большое количество других элементов. Микросхемы на платах РЭА могут работать, выполняя какие-либо функции (на ИМС подаются питание и управляющие сигналы), или не работать (ИМС отключены, не подаются сигналы и питание).

Проведение экспериментальных исследований по стойкости (для набора статистики, построения зависимостей и закономерностей) с печатными платами

действующих РЭА, содержащих современные микросхемы, довольно дорогое удовольствие. Главным образом, это обусловлено большим количеством переменных, которые влияют на стойкость ИМС при воздействии мощного радиоизлучения.

Действительно, на платах РЭА, находящейся в электромагнитном поле, источниками радиочастотных наводок являются все проводники (выводы ИМС, токоведущие линии). Наиболее интенсивные наводки создаются в резонансных структурах, размеры которых близки к половине длины волны, а ориентация совпадает с направлением вектора поляризации поля излучения. В определенном частотном диапазоне мощность импульсов наводки, формирующихся под действием излучения, возрастает пропорционально λ^2 .

При этом критичными переменными следует полагать несущую частоту радиоизлучения (от сотен МГц до десятков ГГц), плотность потока энергии (ППЭ), длительность импульса, частоту повторения радиоимпульсов, поляризацию, углы падения радиоизлучения на ИМС, а также конструктивные и функциональные характеристики микросхем.

В качестве примера на рис. 1 представлены фотографии типичных фрагментов печатной платы (ИМС с разводкой токоведущих линий).

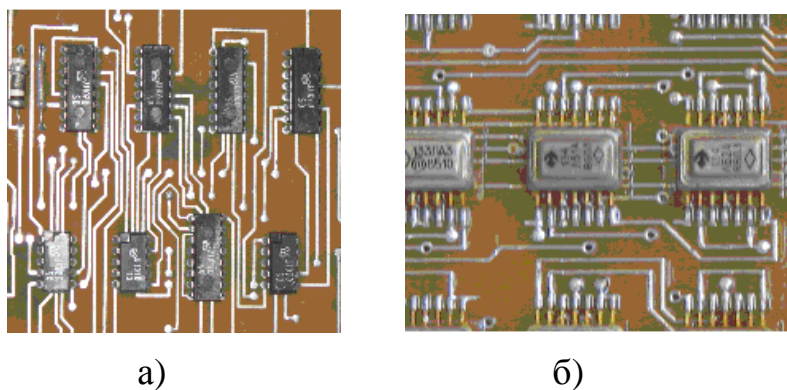


Рис. 1. Фрагменты печатных плат:

а) с пластиковым корпусом; б) с металлическим корпусом.

При проведении испытаний ИМС на стойкость в электромагнитных полях радиоизлучения необходимо создать условия вблизи ИМС такие, которые приближаются к условиям их облучения на печатных платах в составе РЭА.

Такой цели, на наш взгляд, удовлетворяют монтажно-испытательные колодки (МИК), состоящие из держателя для смены микросхем, разводки токоведущих линий и переходного контактного устройства, которое обеспечивает возможность коммутации выводов ИМС и экранировку информационных и силовых кабелей.

Схематично внешний вид монтажно-испытательных колодок представлен на рис. 2.

При формировании токоведущих линий их размеры и форма выбирались, во-первых, из соображений электромагнитной совместимости, а во-вторых, из того, что как правило размеры самых длинных проводников на платах не превосходят ~20 см, но подавляющее большинство имеет размеры, близкие к размерам собственных выводов элементов, т.е. порядка 0,5...3 см.

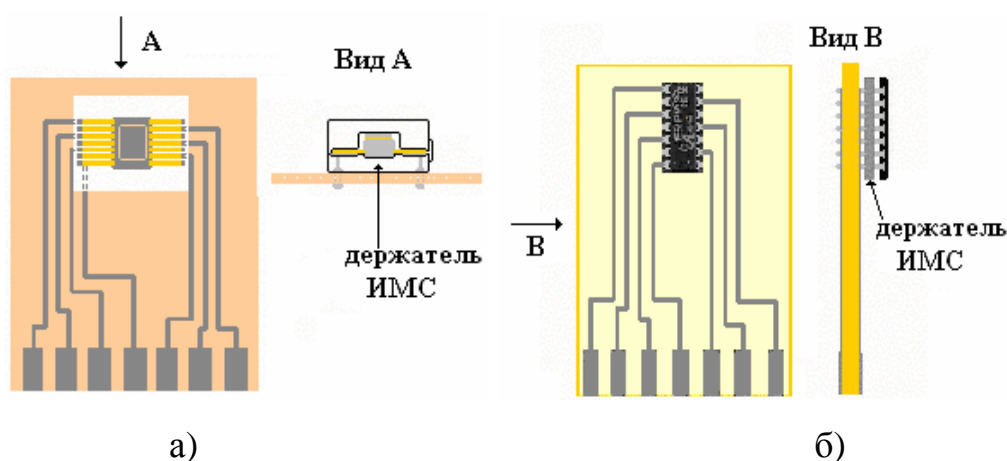


Рис. 2. Вид монтажно-испытательных колодок (МИК):

- а) ИМС с металлическим корпусом; б) ИМС с пластиковым корпусом.

В зависимости от количества выводов, типа корпуса ИМС необходимы разные МИК (держатели, количество токоведущих линий).

При проведении экспериментов микросхемы размещались в МИК, что позволяло воспроизводить результаты с небольшим разбросом значений измеряемых параметров.

Чтобы провести корректный анализ поведения ИМС при воздействии радиоизлучения, необходимо учитывать функциональные особенности работы элементов в составе РЭА. С этой целью исследование стойкости следует проводить как с микросхемами, находящимися в «запитанном» состоянии (подано питание и управляющие сигналы на вход ИМС), так и с «холодными» ИМС (без питания и управляющих сигналов).

Постановка задачи

В общем случае воздействие излучения на ИМС определяется многочисленными и весьма разнообразными факторами, которые можно разделить на несколько групп (совокупностей): X_i – совокупность параметров воздействующего излучения (I – ППЭ, длительность импульса τ , частота повторения импульсов F , длина волны излучения λ и др.); U_i – совокупность технических параметров, т.е. схемных, конструктивных и других характеристик ИМС, определяющих условия воздействия излучения; R_i – совокупность параметров и характеристик ИМС, определяющих ее функциональное назначение.

В общем случае U_i содержат как заданные (известные) параметры и характеристики U_{iz} , так и неизвестные (неопределенные) факторы U_{in} . Некоторые из этих факторов носят случайный характер. Разделение параметров (характеристик) ИМС на совокупность U_i и R_i является в некотором смысле условным, так как отдельные параметры ИМС в зависимости от требуемого типа повреждения, степени исследованных вопросов и т.д. на разных этапах исследования можно отнести как к множеству U_i так и к множеству R_i .

На первом этапе проводится функциональный анализ электрических схем ИМС, в ходе которого микросхема моделируется из функциональных

компонентов (цепочек), оценивается их способность противостоять воздействию радиоизлучения.

Во внешнем электромагнитном поле на выводах ИМС (рис. 3) формируются СВЧ наводка, которая по токоведущим линиям поступает на элементы ИМС (диоды, транзисторы), расположенные на кристалле.

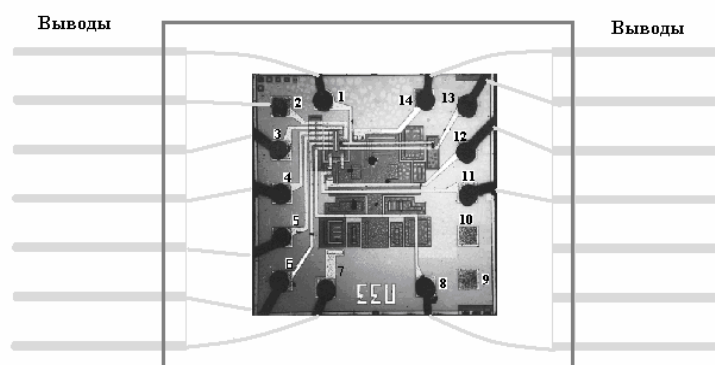


Рис. 3. Схема электрического соединения контактных площадок кристалла с выводами ИМС.

При сравнительно невысоком уровне мощности сигнала наводки происходит его детектирование на нелинейных элементах и формирование видеосигнала. При высоком уровне мощности возможно повреждение р-п переходов, токоведущих линий или контактных площадок.

Таким образом, на первом этапе исследований необходимо определить множества допустимых значений X , Y и R . Особенно сложным является определение множества R (или, что равносильно, определению множества критических значений определяющих параметров R_c). В самом общем виде множество R зависит от факторов X_i и Y_i , т.е. $R(X_i, Y_i)$.

Поскольку процесс воздействия излучения на ИМС сопровождается элементами случайности (например, разбросом ППЭ, дефектов в структуре ИМС), то и оценка повреждения является вероятностной задачей. Таким образом, задачу оценки степени повреждения ИМС при воздействии

излучением можно сформулировать следующим образом: при заданных условиях (факторах, параметрах) Y_{iz} с учетом неизвестных факторов Y_{in} найти такую совокупность параметров излучения X_{ik} (критические параметры излучения) среди множества допустимых параметров X_i , при которых определяющие параметры ИМС R_i выходят за пределы множества допустимых значений R с требуемой вероятностью $P_{тр}$:

$$X_i : P[R_i \in \bar{R}(X_i, Y_i) = R_k]; \quad X_i \in X, \quad Y_i \in Y.$$

В качестве обобщенного показателя повреждения могут быть приняты критические значения параметров излучения (*КЗПИ*), т.е. совокупность значений параметров воздействующего излучения, при котором определяющие параметры ИМС достигают заданных критических значений с вероятностью, близкой к единице: $КЗПИ = X_i; \quad P[R_i \in R_k] \approx 1$.

Данный показатель степени повреждения из-за своей громоздкости и поликритериальности трудно использовать для оценки эффективности поражающего действия излучения. Поэтому предлагается в качестве показателя эффективности (целевой функции) воздействия излучения на ИМС использовать критические значения интенсивности (*ППЭ*) I_k излучения при заданных (фиксированных) значениях остальных параметров:

$$I_k(X_i, Y_i, R_i): P[R_i \in R_k] \approx 1; \quad X_i \in X, \quad Y_i \in Y.$$

В связи с этим задача поиска рациональных режимов воздействия излучения, обеспечивающих снижение требуемых энергозатрат излучения на повреждение ИМС в самом общем виде можно представить в виде

$$\min_{X_i \in X} \max_{Y_i \in Y} \min_{R_i \in R_k} I_k(X_i, Y_i, R_i).$$

Минимизация целевой функции I_k путем выбора рациональных параметров излучения и рациональных критериев повреждения из множества допустимых значений естественна. Максимизация целевой функции по условиям воздействия обусловлена наличием неопределенных факторов Y_{in} . В

этом случае, исходя из принципов гарантированного результата, необходимо учитывать и наименее благоприятные значения неопределенных факторов.

Поскольку механизмы повреждения ИМС излучением исследованы недостаточно, то на начальном этапе целесообразно искать рациональные режимы воздействия излучения из условия $\min_{X_i \in X} I_k(X_i, Y_i, R_i)$, считая, что факторы (Y_i, R_i) заданы (известны).

Необходимо отметить, что если воздействие излучения приводит только к временной потере работоспособности ИМС, то в качестве показателя эффективности целесообразно использовать два численных показателя: критическую ППЭ излучения I_k и требуемое время нарушения работоспособности (подавления) ИМС t_p . Причем время подавления зачастую определяется в основном характеристиками и условиями функционального применения ИМС в РЭА.

Таким образом, оценка степени повреждения ИМС излучением имеет многоступенчатый и итеративный характер.

Функциональный анализ электрических схем ИМС показывает, что повреждение микросхем при облучении СВЧ излучением может происходить в результате комбинации повреждений p - n переходов и металлизации. Наиболее уязвимыми (наименее стойкими) к радиоизлучению являются входные и выходные элементы микросхем и цепи питания, на которые СВЧ наводки поступают непосредственно с выводов ИМС.

На втором этапе проводятся эксперименты с ИМС при воздействии радиоизлучения малого уровня мощности, в ходе которого излучение (может быть, как непрерывное, так и импульсное) используется для снятия функциональных характеристик взаимодействия с ИМС.

По существу исследование стойкости ИМС в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения (открытая схема испытаний) является логическим продолжением исследования стойкости ИМС по закрытой схеме [9], где

высокочастотные импульсы подаются на вход (выход или питание) исследуемой микросхемы по линии (коаксиальной, микрополосковой и др.), в которую включен и сам исследуемый элемент.

Выделим некоторые параметры микросхем, которые на наш взгляд существенно влияют на стойкость ИМС в открытой схеме испытаний:

U_i – длина и конфигурация выводов микросхем, их взаимное расположение, ориентация относительно вектора напряженности электрического поля, размеры и тип корпуса, технология изготовления, уровень интеграции ИМС, неоднородности распределения легирующих примесей, дефекты на поверхности и в объеме структуры и т.п.;

R_i - в “запитанном” состоянии (подаётся необходимое напряжение питания, подаются управляющие сигналы) или в “холодном” состоянии (без источника питания).

Следующим является испытательный этап, в ходе которого необходимое (для набора статистики) количество ИМС подвергается испытаниям до возникновения повреждений.

На четвертом этапе экспериментов проводилось исследование стойкости ИМС (ограниченное количество микросхем), размещенных на платах от различных радиоэлектронных устройств.

Поэтому рекомендуется при проведении экспериментов, в ходе которых оценивались эффекты воздействия, режимы облучения микросхем начинать с минимального уровня *ППЭ* и минимальной частоты следования радиоимпульсов. В каждой последующей серии облучения производится увеличение уровня мощности радиоимпульсов.

Заключительный этап - это этап обработки данных. Данные испытаний объединяются с предварительной оценкой стойкости ИМС до проведения испытаний. На их основе разрабатывается окончательная оценка степени устойчивости работы ИМС во время и после воздействия радиоимпульсов.

Понятия электромагнитной стойкости до настоящего времени не стандартизированы и обычно используются близкие понятия радиационной стойкости, определенные, например, в ГОСТ 18298-79.

Для характеристики состояния ИМС в электромагнитных полях радиоизлучения введем термин стойкости, который характеризует работоспособное состояние микросхемы, т.е. ее способность выполнять заданные функции, соответствующие требованиям нормативно-технической (НТД) и (или) конструкторской (КД) документаций во время и после воздействия радиоизлучения.

Например, для цифровых ИМС, которые являются сложными микроэлектронными изделиями, важнейшей характеристикой, определяющей их работоспособность является зависимость выходного напряжения от входного $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$ (передаточная характеристика). Типичный вид передаточной характеристики представлен на рис. 4.

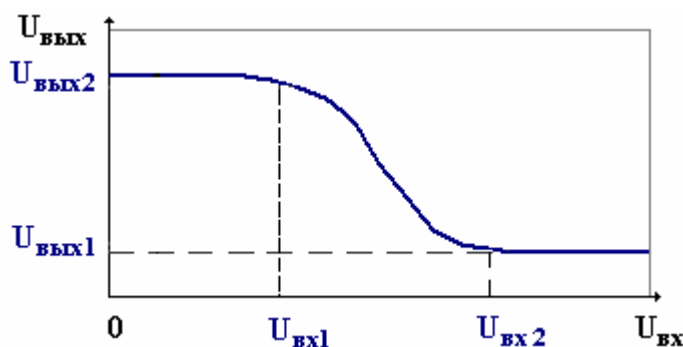


Рис. 4. Типичная передаточная характеристика микросхем

Выходной сигнал цифровой ИМС может (в зависимости от амплитуды напряжения на входе) принимать значения, заключенные между напряжениями высокого $U_{\text{вых}2}$ и низкого $U_{\text{вых}1}$ уровней.

Переключение микросхем из состояния с высоким уровнем напряжения $U_{\text{вых}2}$ в состояние с низким уровнем напряжения $U_{\text{вых}1}$ происходит при

превышении амплитуды входного напряжения порогового значения, например, для микросхем 133-й серии при амплитуде входного сигнала $> 0,8...1$ В.

Логические схемы в электронных устройствах соединяются последовательно, поэтому их входные напряжения определяются выходными напряжениями предыдущих микросхем и формирование на выходе микросхемы видеосигнала с амплитудой $> 0,8...1$ В может привести к ложному срабатыванию последующих аналогичных ИМС.

Поэтому будем считать микросхемы стойкими к радиоизлучению, когда воздействие не вызывает ложного переброса их триггеров и в пределах установленных норм гарантируется нормальное функционирование последующих аналогичных микросхем во время и после воздействия радиоизлучения.

Хотя современные микросхемы отличаются по используемым материалам, технологии изготовления, степени интеграции, наличию защиты от электростатического разряда и т.д., однако понятие стойкости в электромагнитных полях радиоизлучения, т.е. способность выполнять заданные функции во время и после воздействия радиоизлучения сохраняется и для них.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния ИМС, называется отказом. За уровень электромагнитной стойкости микросхем можно принять максимальный уровень радиоизлучения, воздействующего на ИМС, до которого описанное выше ложное срабатывание не происходит.

В зависимости от уровня поглощенной элементами микросхемы СВЧ мощности можно выделить следующие наблюдаемые нарушения работоспособности ИМС, которые будут определять её стойкость:

- помехи и обратимые отказы с восстановлением нормальных характеристик и параметров после прекращения воздействия радиоизлучения;
- деградационные изменения параметров и характеристик с медленным ухудшением технических характеристик изделий в процессе эксплуатации и выходом рабочих параметров изделия за пределы установленных допусков;

- быстрые «катастрофические» отказы с необратимым нарушением работоспособности.

Помехи и обратимые отказы возникают при сравнительно низких уровнях мощности радиосигналов. Они, в частности, могут быть связаны с детектированием радиоизлучения в диодах и транзисторах микросхем. Данная категория нарушений работоспособности ИМС охватывает также переходные электромагнитные процессы, переход полупроводниковых компонентов в режим насыщения или режим запираания.

Деградационные изменения наблюдаются при промежуточных значениях средней мощности радиоизлучения и энергии импульсов.

Катастрофические отказы, обусловленные воздействием мощного излучения, связаны с выделением тепла в локальной области микросхемы, с проплавлением полупроводника, выгоранием контактных элементов, металлизацией и пробоями диэлектриков. Механизм подобных повреждений может быть обусловлен многочисленными причинами, причём не только теми, о которых имеется представление в настоящее время, но и неизвестными. Существенное влияние на критические уровни СВЧ мощности, вызывающие катастрофические отказы, оказывают «скрытые дефекты» материалов и конструктивно-технологические особенности микросхем (технология, топология ИМС, тип корпуса, выводов и т.п.).

Эксперименты с ИМС при воздействии радиоизлучения малого уровня мощности

Падающее излучение создает наводку на проводниках и выводах ИМС. Наводки формируются на всех проводниках. Амплитуды наводок зависят от размеров проводников и выводов ИМС, формы, ориентации относительно электрического вектора электромагнитной волны и т.п.

Радиочастотные наводки попадают на нелинейные элементы (главным образом это диоды и транзисторы), где в результате детектирования

формируются низкочастотные сигналы. Именно низкочастотные сигналы свободно распространяются по РЭА и приводят к помехам в ее работе.

Понимание эффектов детектирования оказывается принципиально важным не только для оценки эффектов функциональных сбоев в работе РЭА, но для поиска уязвимых (наименее стойких к излучению) элементов как в аппаратуре в целом, так, и в микросхемах.

На этом этапе необходимо провести исследования зависимости восприимчивости микросхем от взаимной ориентации выводов ИМС и вектора электрического поля E в падающей волне и других факторов. Количественной мерой восприимчивости ИМС может служить амплитуда продетектированного сигнала, формируемого в ИМС под действием радиоизлучения, в цепях питания, на входах и выходах ИМС.

Исследование влияния взаимной ориентации выводов ИМС и вектора электрического СВЧ излучения на работоспособность микросхем

На рис. 5 дана схема расположения микросхем относительно вектора электрического поля падающего излучения.

Из-за сложности и громоздкости на рисунке не показаны монтажно-испытательные колодки.

После облучения, регистрации ППЭ и уровня продетектированных наводок на входах, выходах и в цепи питания положение микросхемы последовательно изменялось, как показано на рис. 5.

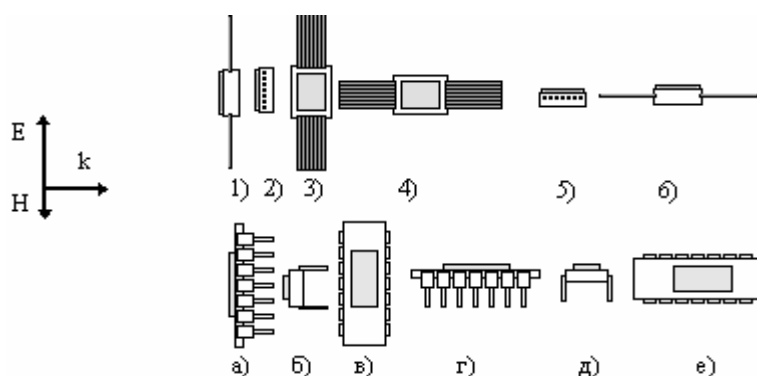


Рис. 5. Схема расположения ИМС относительно поляризации падающего СВЧ излучения.

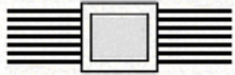
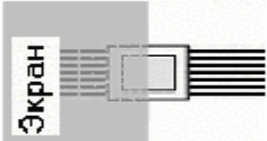
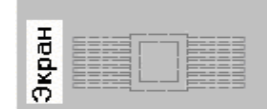
Максимальная амплитуда наводки достигалась при ориентации выводов вдоль вектора электрического поля, а минимальная - при ортогональной ориентации.

Для цифровых интегральных микросхем в сантиметровом диапазоне длин волн протектированные сигналы уровня 1 В возникают при интенсивности СВЧ излучения $\sim 1 \text{ Вт/см}^2$.

Зависимость амплитуды и формы протектированного сигнала от интенсивности падающего на ИМС излучения позволяет в большинстве случаев предсказать появление необратимых изменений характеристик микросхем. Так, например, если замедляется рост амплитуды протектированного сигнала с увеличением интенсивности, а в некоторых случаях наблюдается изменение знака протектированного сигнала, то эти эффекты могут свидетельствовать о развитии электрического пробоя и о возможном повреждении ИМС.

Для анализа влияния типа корпуса ИМС были проведены исследования влияния «затенения» выводов и корпуса ИМС на амплитуду помеховых сигналов. Для этого в экспериментах использовался металлический экран, которым проводилось затенение части выводов и корпуса микросхемы. Например, для микросхемы 133ЛДЗ этапы экранировки представлены в таблице.

Таблица. Этапы экранировки.

Этапы экранировки	
а) без экрана	
б) экран закрывает выводы №1..7 и половину ИМС	
в) экран полностью закрывает выводы и саму ИМС	

Без экранировки (этап а) сигнал наводки на пространственно разнесенных выводах 7 (земля) и 13 (вход) в 1,5...2 раза превышал уровни сигналов наводки на рядом расположенных выводах 7 и 6(вход). Это приводит к тому в первую очередь, что рассеиваемая мощность достигает критического уровня на защитном диоде, включенном в цепь выводов (7 - 13), и происходит его повреждение. При дальнейшем увеличении интенсивности СВЧ излучения выгорает диод в цепи выводов (6 - 7).

Экранировка выводов № 1..7 и половины ИМС (этап б) приводит к уменьшению амплитуды протектированного сигнала на выводе 13 примерно в два раза. При полной экранировке микросхемы на всех выводах пропадают сигналы.

Для металлического корпуса затенение выводов ИМС с одной стороны уменьшало амплитуду протектированного сигнала на входе ИМС в два раза. Дальнейшее затенение корпуса ИМС не влияло на амплитуды протектированных сигналов. Для ИМС с пластиковым корпусом затенение выводов ИМС с одной стороны, как и для микросхем с металлическим корпусом уменьшало амплитуду протектированного сигнала на входах ИМС. Дальнейшее затенение корпуса вело к еще большему уменьшению амплитуды

продетектированного сигнала. По всей видимости, это связано с затенением проводников, соединяющих выводы и чип ИМС (рис. 6).

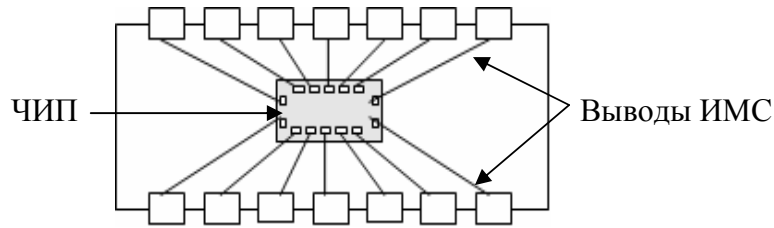


Рис. 6. Схема электрического соединения контактных площадок кристалла с выводами ИМС

В изделиях электронной техники полупроводниковые элементы расположены на платах и соединены токоведущими линиями с другими элементами. Размеры токоведущих линий могут иметь разную величину. В этой связи представляет интерес исследовать *влияние «длины выводов микросхем + прямой участок токоведущих линий» на амплитуду продетектированных сигналов СВЧ наводки.*

Выполненные исследования показали возможность использования «антенной модели» [10] для описания воздействия СВЧ излучения на ИМС.

В соответствии с данной моделью каждый из металлических проводников (выводов ИМС + прямой участок токоведущих линий) является приемной антенной, эквивалентной схемой которой является генератор э.д.с. $\mathcal{E} = l_d E F(\theta) \cos(\theta)$ с внутренним сопротивлением Z_A , где E – амплитуда электрического поля, l_d – действующая длина проводника, θ – угол между вектором электрического поля и осью проводника, $F(\theta)$ – диаграмма направленности проводника, Z_A – импеданс антенны. Все перечисленные параметры можно найти из теории вибраторных антенн.

Мощность, которая выделялась бы в линейной нагрузке, имеет вид

$$P = I \cdot S_{эфф} F(\theta)^2 \cos(\theta)^2 k_s,$$

где I – плотность потока энергии падающего излучения, R_{Σ} – сопротивление излучения вибратора, $S_{эфф}$ – эффективная площадь приема излучения выводами-вибраторами, $S_{эфф} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D$, D – коэффициент направленного действия, k_S – коэффициент согласования вибратора, который для входного диода, например, имеет вид $\frac{4R_{\Sigma} |Z_D|^2}{R_j |Z_A + Z_D|^2}$. Величина мощности, близкая к максимальной может достигаться в условиях полуволнового резонанса, когда длина выводов $2l$ примерно равна половине длины волны ($2l = \lambda/2$), при этом сопротивление выводов является чисто активным $Z_A \approx 73 \text{ Ом}$, а коэффициент направленного действия составляет $D = 1,64$.

Условия и порядок проведения экспериментов по исследованию стойкости ИМС

Для приближения условий к тем, в которых находятся микросхемы на платах РЭА, испытания необходимо проводить как в “запитанном” (подавались необходимое напряжение питания и управляющие сигналы), так и в “холодном” (без источника питания и сигналов) состоянии. Все сигналы подавались по коаксиальным кабелям с волновым сопротивлением 50 Ом.

Для оценки реакции микросхемы до, в момент и после воздействия радиоизлучения желательно регистрировать следующие параметры ее функционирования:

- сигналы на входах ИМС;
- сигнал на выходе ИМС (его искажение и пропадание);
- напряжение питания (изменение потребляемой мощности) и протектированный сигнал в цепи питания.

Регистрация сигналов позволяет в реальном времени наблюдать за изменениями в работе микросхем.

Критерием нарушения работоспособности микросхемы (критерием повреждения) служило необратимое после окончания воздействия излучения искажение формы выходного сигнала.

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 7.

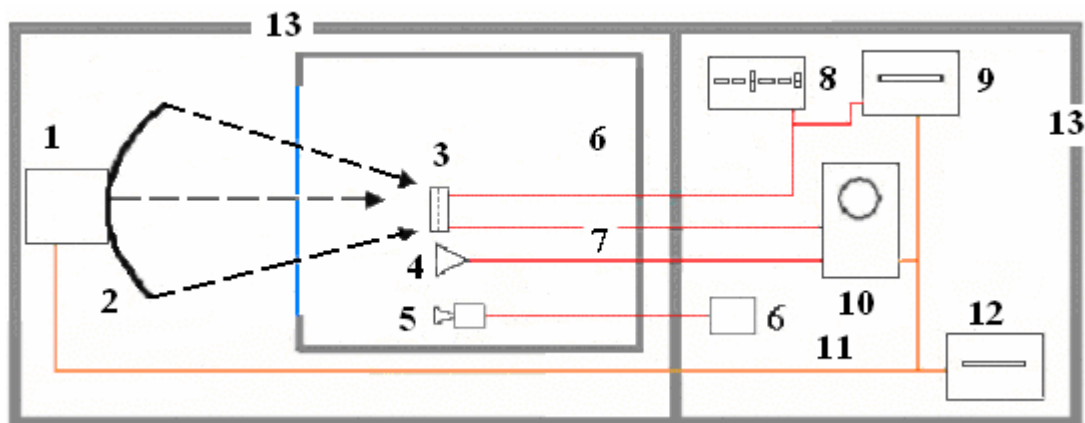


Рис. 7. Схема проведения экспериментов.

Перед испытаниями на месте установки ИМС устанавливалась и производилась калибровка измерителя плотности потока энергии $ППЭ = E^2/2W_0$, E – амплитуда электрического поля электромагнитной волны, $W_0 = 120\pi$, Ом.

Измерения плотности потока энергии $ППЭ$ (интенсивности I) можно проводить в два этапа. Сначала следует выполнить измерения среднего значения $ППЭ_{cp}$ с помощью ваттметра МЗ-22А, термисторной головки М5-42 и калиброванной приемной антенны (рупора) с известной эффективной площадью раскрытия. После этого плотность потока энергии определяется по измеренному значению $ППЭ_{cp}$: $ППЭ = Q \cdot ППЭ_{cp}$, где $Q = 1/(F\tau)$ – скважность, F – частота повторения импульсов, τ – длительность импульсов по уровню половинной мощности.

Это достаточно точный метод измерения $ППЭ$, точность обычно составляет ~ 1 дБ.

Одновременно необходимо контролировать форму и амплитуду радиоимпульсов с помощью детектора. Этот контроль продолжается и после измерения *ППЭ*, чтобы избежать изменения *ППЭ*, падающего на ИМС радиоизлучения во время испытаний.

Монтажно-испытательная колодка с микросхемой 3 помещалась в поле излучения СВЧ генератора 1 в безэховой камере 6 (вместо канала измерения *ППЭ*) так, чтобы вектор электрического поля был направлен вдоль выводов ИМС + прямой участок токоведущих линий.

По экранированным кабелям 7 на ИМС подавалось питание 8 и входные сигналы от генератора импульсов (ГИ) 9. Сигналы со входов, выхода и цепи питания микросхемы подавались на осциллограф 10. Запуск генератора радиоимпульсов и ГИ производился от единого источника синхросигнала 12. Это позволяло вводить контролируемую временную задержку между импульсом от ГИ, подаваемым на ИМС, и радиоимпульсом.

Реакция ИМС на воздействие радиоизлучения определялась по изменению формы сигналов на входе, выходе и цепи питания микросхемы в процессе облучения и после его окончания. Помимо этого контролировались изменения потребляемой мощности.

Вся измерительная аппаратура и аппаратура, обеспечивающая рабочий режим микросхемы, устанавливались вне зоны облучения в экранированном помещении 13.

При проведении экспериментов, в ходе которых оцениваются эффекты воздействия, режимы облучения микросхем необходимо начинать с минимального уровня *ППЭ* и минимальной частоты следования радиоимпульсов, чтобы не пропустить начало деградиационных процессов в ИМС.

Действительно, экспериментально установлено [11-12], что под действием мощных повторяющихся радиоимпульсов при превышении определенного

порога в значительном числе случаев наблюдается ухудшение характеристик микросхем «от импульса к импульсу».

Поэтому в каждой последующей серии облучения следует производить увеличение уровня мощности радиоимпульсов ориентировочно в 1.5 ..2 раза.

После каждого воздействия необходимо провести контроль параметров ИМС по показаниям приборов контрольно-проверочной аппаратурой. Такой режим работы сохраняется до достижения эффекта обратимого отказа или повреждения ИМС.

При достижении обратимого отказа или повреждения ИМС, фиксируется время облучения $t_{отказа}$ и параметры радиоизлучения (значения $ППЭ$, F , τ). Время воздействия радиоизлучения на микросхему отслеживается по осциллографу и таймеру.

Затем меняется ИМС, и испытания повторяются до достижения обратимого отказа или повреждения. Результаты опытов заносятся в протокол.

Максимальный уровень мощности радиоизлучения определяется, исходя из анализа наблюдаемых эффектов воздействия, предварительных экспериментальных данных, литературы и ограничений, накладываемых на однородность пучка излучения (неоднородность поля в выбранной области не должна превышать 0.5).

Исследование стойкости отдельных ИМС, размещенных в МИК

Экспериментальные исследования [11] были выполнены в четырехсантиметровом диапазоне длин волн.

Из результатов следует, что для большей части микросхем (ТТЛ, ТТЛШ, КМОП) с металлическим корпусом уровни повреждения лежат в диапазоне $ППЭ \approx 20...50 \text{ Вт/см}^2$ при $\tau = 10 \text{ мкс}$ и возрастают до 1500 Вт/см^2 при $\tau = 0,3 \text{ мкс}$.

Разброс значений $ППЭ$, при которых происходит повреждение цифровых ИМС (с металлическим корпусом и с малым числом элементов на кристалле),

оказывается сравнительно небольшим ~ 4 дБ, несмотря на значительное разнообразие типов микросхем и разные режимы их функционирования (“запитанные” или “холодные”).

Менее стойкими к действию импульсного радиоизлучения оказались ИМС с пластмассовым корпусом, а микросхемы памяти оказались самыми уязвимыми. Особенно заметное отличие уровней повреждения наблюдается в области коротких импульсов: так, если при $\tau = 10$ мкс $ППЭ \approx 7 \dots 9$ Вт/см², то при $\tau = 0,3$ мкс $ППЭ \approx 60$ Вт/см².

Для микросхем памяти уровни повреждения оказались в несколько раз меньше, чем для цифровых микросхем. Это связано с тем, что микросхемы памяти имеют высокую степень интеграции и малые размеры элементов, которые примерно на порядок меньше размеров элементов микросхем цифровой логики.

Следует отметить, что все результаты измерений носят статистический характер. Даже на идентичных микросхемах выход из строя регистрировался при разных параметрах радиоизлучения (отличались интенсивность или время выхода из строя). Это связано, в частности, с различием в таких слабо контролируемых параметрах микросхем, как число и распределение дефектов внутри p - n переходов и в других элементах ИМС.

Часто оказывается, что в поле радиоизлучения попадают не отдельные компоненты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а целые узлы, платы, на которых могут размещаться десятки диодов, транзисторов, микросхем, токоведущие линии, их соединяющие. Реакция РЭА на действие радиоизлучения имеет более сложный характер по сравнению с действием на элементную базу. Информация об этих эффектах крайне скудна [13-19]. Поэтому представляет интерес сравнить уровни повреждения отдельных ИМС, размещенные в МИК, с уровнями повреждения микросхем, размещенных на печатных платах РЭА.

Исследование стойкости ИМС, размещенных на платах, от различных радиоэлектронных устройств

На плате выбиралась функциональная цепочка микросхем, работа которой исследовалась при воздействии радиоизлучением.

У микросхем, находящихся в области облучения, были зарегистрированы как эффекты временной потери работоспособности (при интенсивности СВЧ излучения $1..3 \text{ Вт/см}^2$), так и повреждения при увеличении интенсивности радиоизлучения. Если вектор электрического поля был направлен вдоль выводов ИМС, то уровни повреждения довольно хорошо соответствуют уровням, полученным в экспериментах с отдельными микросхемами. Так, выход из строя ТТЛШ и КМОП ИМС на платах наблюдался при ППЭ радиоизлучения $\sim 150...250 \text{ Вт/см}^2$ при длительности радиоимпульса $\tau = 5 \text{ мкс}$.

Обработка полученных данных позволяет получить информацию о стойкости ИМС в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения.

Выводы

Рассмотренный подход в методике проведения исследований позволяет:

- уточнить объект исследования,
- определить круг задач при исследовании стойкости ИМС и последовательность их решения;
- построить схему испытаний и уточнить критичные переменные (несущую частоту радиоизлучения, плотность потока энергии, длительность импульса, частоту повторения радиоимпульсов, поляризацию, углы падения мощного радиоизлучения, а также конструктивные и функциональные характеристики микросхем).

Контроль сигналов на входах, выходах и в цепях питания ИМС дает более наглядное представление о процессах, происходящих в структуре ИМС.

Использование МИК позволяет уменьшить разброс и повысить стабильность в определении уровней повреждения (стойкости) ИМС, несмотря на значительное разнообразие типов микросхем и разные режимы их функционирования (“запитанные” или “холодные”).

Сопоставление полученных уровней повреждения ИМС с результатами других экспериментальных работ по повреждению ИМС, например, [1,2] (выполненных при других параметрах радиоизлучения) показывает, что имеется качественное согласие. При этом для пересчета использовалась антенная модель и тепловая модель Вонша-Белла [19]. При более глубоком анализе необходимо также иметь в виду модели, разработанные недавно в ИРЭ РАН в лаборатории В.А.Черепенина [20,21].

Представленные результаты экспериментальных исследований стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения 4-см диапазона, размещенных в МИК, хорошо соответствуют уровням повреждения ИМС, размещенных на платах радиоэлектронных устройств.

Использование предложенных методических подходов при проведении количественного анализа стойкости ИМС позволяет стандартизировать исследования, создание гарантированных, достоверных условий проведения испытаний ИМС, а также получение результатов, которые могут эффективно использоваться при оценке степени воздействия радиоизлучения на РЭА.

В целом использование описанной методики позволяет расширить возможности исследования стойкости ИМС по закрытой схеме экспериментов и приблизить результаты испытаний по исследованию стойкости ИМС к реальным проявлениям в интегральных микросхемах, расположенных на печатных платах РЭА.

Литература

1. Магда И.И., Блудов С.Б., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А., Пушкарев С.С., Ткач Ю.В., Чумаков В.И., Лобков М.М. Механизмы деградации ИЭТ в полях мощного СВЧ излучения // Петербургский журнал электроники, 1995, №3, с.56-59.
2. Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А. Воздействие электромагнитных поле на интегральные микросхемы // Измерительная техника, 1998, №4, с.65-67.
3. Clayborne D. Taylor, Nicolas H. Younau. Effects from high power microwave illumination. // Microwave Journal, 1988, 35, №6, pp.80-96.
4. Tasca D.M. Pulse power failure modes in semiconductors // IEEE Trans., 1970, Vol.NS-17, No.2, p.364-372.
5. Блудов С.Б., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А., Лонин Ю.Ф., Магда И.И., Пушкарев С.С., Ткач Ю.В., Чумаков В.И. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники // Физика плазмы, 1994, т. 20, №7-8, с.712-717.
6. Иванов Ю.Г., В.Р. Осипов, А.Н. Руденко. Экспериментальные исследования влияния СВЧ электромагнитных полей на функционирование ИМС // Исследование процессов в распределенных системах и средах.- М.: Ин-т физ.-техн. проблем АН СССР, 1991, с.100-107.
7. Бригидин А.М., Титович Н.А., Кириллов В.М.. Влияние электромагнитных помех на цифровые интегральные схемы // Электронная техника. Серия: Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания, 1989, вып.5(137), с.35-57.
8. Абдурахимов Д.Е. и др. Воздействие электромагнитных СВЧ импульсов на структуру примесных неоднородностей в кристаллах

- кремния и характеристики полупроводниковых приборов // Микроэлектроника, 1992, т.21, вып.1, с.82-89.
9. *Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д.В., Кожевников А.О., Раваев А.А.* Изменение параметров МШУ при воздействии мощных импульсных помех // Радиотехника, 1991, №8, с. 18-20.
 10. *Strickland B.R., Auden N.F.* Numerical analysis technique for diode-loaded dipole antennas // IEEE Trans. EC, 1993, Vol. 35, No.4, p.480.
 11. *Васильев К.Б., Ключник А.В., Солодов А.В.* Повреждение цифровых интегральных микросхем под действием импульсного радиоизлучения // Материалы докладов 11-ой Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».- Севастополь: СевГТУ, 2001, с.300.
 12. *Васильев К.Б., Ключник А.В., Солодов А.В.* Статистика отказов цифровых ИМС, вызванных импульсным радиоизлучением. // Материалы докладов 9-й Междунар. Крымской конфер. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».- Севастополь: СевГТУ, 1999, с.329-330.
 13. *LoVetri J., Wibers A.T.M., Zwamborn A.P.M.* Microwave interaction with a personal computer: experiments and modeling // Proc. of the 13th Int. Zurich Symp. on EMC (Zurich, Switzerland), 1999, pp.203-206.
 14. *Arnessen O.H., Krogager E., Backstrom M., et al.* High Power Microwave Effects on Civilian Wireless Equipment // EMC Europe Conference, Rome, 2005.
 14. *Nilsson T., Mansson D., Backstrom M.* EMI Effects on Some Wireless Systems (GPRS Receivers) // IEEE EMC Meeting, Sweden chapter, 2006, Uppsala, p.1.
 15. *Бердышев А.В., Ивойлов В.Ф., Исайкин А.В., Козирацкий Ю.Л., Щеренков В.В., Ярыгин А.П.* Экспериментальные исследования воздействия СВЧ импульсов на содержащие интегральные микросхемы

- радиоэлектронные устройства // Радиотехника, 2003, №6, с.85-88.
16. *Юшков Ю.Г., Чумерин П.Ю., Артеменко С.Н., Новиков С.А., Зеленцов Д.В.* Экспериментальные исследования воздействия сверхвысокочастотных импульсов на работу персонального компьютера // Радиотехника и электроника, 2001, т.46, №8, с.1020-1024.
17. *Гадецкий Н.П., Кравцов К.А., Магда И.И.* Функциональные сбои персонального компьютера при воздействии электромагнитных импульсов сверхкороткой длительности // Материалы докладов 11-ой Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».- Севастополь: СевГТУ, 2001, с. 326-327.
18. *Mansson D., Thottappillil R., Nilsson T., Lunden O., Backstrom M.* Susceptibility of Civilian GPS Receivers to Electromagnetic Radiation // IEEE Trans., 2008, EMC-50, No.2, p.434-437.
19. *Waunch D.C., Bell R.R.* Determination of threshold failure levels semiconductor diodes and transistors due to pulse voltage // IEEE Trans., 1968, Vol.NS-15, No.6, p.244-259.
20. *Вдовин В.А., Кулагин В.В., Черепенин В.А.* Помехи и сбои при нетепловом воздействии короткого электромагнитного импульса на радиоэлектронные устройства // Электромагнитные волны и электронные системы, 2003, т. 8, №1, с.64-73.
21. *Зиглин С.Л., Репецкая Л.В., Черепенин В.А.* Воздействие мощных колебаний на импульсные устройства // Электромагнитные волны и электронные системы, 2008, т.13, №6, с.16-17.