

УДК 621.039.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Н.А. ТИТОВИЧ, В.В. ПОЛЗУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 9 февраля 2015*

По мере расширения сферы применения радиоэлектронных устройств, основными элементами которых являются полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные микросхемы (ИМС), все большую актуальность приобретают вопросы защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от влияния ВЧ и СВЧ электромагнитных помех (ЭМП). Основными факторами, обуславливающими повышенный интерес к данной проблеме, являются [1]:

– непрерывное повышение уровней мощностей современных радиопередатчиков до сотен киловатт в непрерывном и десятков мегаватт – в импульсном режиме. В связи с этим многие радиоэлектронные устройства вынуждены работать в электромагнитных полях, плотность потока мощности которых достигает нескольких десятков  $\text{kBt/m}^2$  в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн (см. рис. 1);

– повышение степени интеграции современных ИМС. При этом снижаются уровни используемых напряжений и токов. Энергия полезных сигналов микроразмерных устройств сравнима, а порой и меньше энергии ЭМП. Кроме того, в связи с ростом быстродействия современных цифровых систем, уменьшением длительностей рабочих сигналов до единиц и даже долей наносекунд, сами вычислительные устройства могут создавать уровни ВЧ помех, достаточные для наступления сбоя;

– постоянное усложнение радиоэлектронных систем (РЭС). Перед разработчиком нередко стоит задача насыщения небольшого по объему объекта РЭА различного функционального назначения. Неизбежная теснота размещения обуславливает взаимные помехи друг другу, обостряет проблему электромагнитной совместимости (ЭМС);

– развитие средств радиоэлектронной борьбы. Наличие источников сверхмощных СВЧ сигналов, построенных на гиротронах, клистронах, магнетронах, лазерах, генераторах плазменных пучков, делает вполне реальным целенаправленное воздействие на радиоаппаратуру на расстоянии с целью выведения ее из строя путем поражения чувствительной элементной базы.

Традиционные методы повышения помехоустойчивости РЭС можно условно разделить на конструкционные, схемотехнические и системные. Как правило, вопросами защиты аппаратуры от воздействия помех начинают внимательно заниматься лишь на стадии конструкторской проработки изделия. Поэтому конструкционные методы наиболее распространены. Чаще всего для борьбы с помехами используют экраны. Применяя идеальные непрерывные экраны можно достичь эффективности экранирования 100 дБ и выше. Однако на практике получить такое ослабление достаточно сложно. Наличие в стенках корпусов-экранов неоднородностей (отверстий и щелей для вентиляции и индикации, вводов, стыков, крышек и др.) создает дополнительные каналы для проникновения электромагнитных полей в экранируемую область. Более эффективными являются экраны специальной конструкции, например, с выполнением отверстий для вводов, вентиляции и индикации в виде заградительных волноводов. Однако при этом значительно возрастает стоимость всего изделия, его габариты и вес. Известные схемотехнические методы предполагают использование для снижения уровней

помех фильтров, дросселей, трансформаторов, защитных разрядников, элементов оптоэлектроники. Эффективным средством повышения помехоустойчивости являются системные методы, связанные с использованием корректирующих кодов, позволяющих исправлять системные и групповые ошибки. Однако когда помеха воздействует не только на линию связи, но и одновременно на все устройства обработки и информацию, содержащуюся в них, желаемого результата они также не дают.



Рис. 1. Анализ электромагнитной обстановки в зоне действия современной РЭА



Рис. 2. Зависимость стоимости затрат по обеспечению ЭМС от этапа проектирования.

В таких условиях большим резервом повышения помехоустойчивости РЭС является учет восприимчивости к воздействию ЭМП элементной базы, в частности ПП и ИМС. Системный подход к проектированию РЭА предполагает рассмотрение вопросов, касающихся повышения надежности ее работы, уже на самой нижней ступени иерархической лестницы, а именно при выборе элементной базы и проектировании печатных плат. Так как наведенные помеховые сигналы в конечном итоге попадают в цепи радиоэлектронных устройств и воздействуют на их элементы, то помехоустойчивость систем связи, радиуправления, обработки информации во многом определяется восприимчивостью элементной базы, в особенности ПП и ИМС. Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых показывают, что выбор менее восприимчивой к воздействию помех элементной базы позволяет в десятки раз снизить затраты по обеспечению ЭМС на стадии эксплуатации аппаратуры (рис. 2).

Исследования восприимчивости элементов схем, в частности ПП и ИМС, к воздействию ВЧ и СВЧ помех были начаты в 1970-х г. в связи с проблемами, возникшими при эксплуатации специальной техники. Результаты первых испытаний влияния радиопомех на характеристики и параметры ПП и ИМС достаточно подробно изложены в [1, 2]. Новый импульс данные исследования получили в наше время [3], что обусловлено не только дальнейшим развитием специальных систем радиопротиводействия, но также и требованиями обеспечения безопасной эксплуатации промышленного оборудования, транспорта, систем связи, бытовой техники.

При выборе метода исследования восприимчивости ПП и ИС к воздействию ЭМП необходимо руководствоваться следующими основными критериями: получение максимума информации об изменении характеристик и параметров ПП и ИС в условиях действия помех, точность определения уровней воздействующих помеховых сигналов и значений контролируемых параметров, минимизация затрат на проведение исследований, приближение условий эксперимента к реальной помеховой обстановке.

При оценке восприимчивости радиоэлектронных устройств и блоков для имитации воздействия радиопомех используется метод излучения, в котором помеховый сигнал поступает к антенне, излучающей его в направлении исследуемого объекта, расположенного обычно на расстоянии одного метра от облучателя. Такой способ применялся и при испытаниях на помехоустойчивость ПП и ИМС [1, 4, 5]. За критерий оценки принимался уровень воздействия, приводящий к необратимому отказу, т.е. к выходу из строя элемента. Исследования показали [4, 5], что чаще всего наступали деграционные изменения параметров в цепях ИМС, имеющих более длинные выводы, либо ориентированные перпендикулярно

вектору электромагнитного поля. При воздействии серии СВЧ-импульсов деградационные изменения накапливались. Чаще всего причиной отказа являлся пробой входных диодов Шоттки и р–n-переходов транзисторов ТТЛШ элементов. Однако при таком методе испытаний очень сложно точно определить энергию помехового сигнала, поглощенную транзистором, ИМС или р-n-переходом; при расчете уровней наводок ЭМП на выводы ПП и ИС и их внешние цепи приходится делать много допущений в связи с неопределенностью ориентации проводников различных конструкций испытываемых образцов по отношению к направлению вектора поля помехи. Кроме того, такие испытания экономически дороги. Поэтому метод излучения, эффективный при испытаниях отдельных узлов и блоков, в данном случае целесообразно заменить на кондуктивный способ подачи ЭМП на выводы ПП и ИМС. Подавая радиопомеху через разделительную емкость непосредственно на вывод исследуемого элемента, можно с помощью известных методов достаточно точно определить уровни поглощенной им энергии помехового сигнала. Однако при подаче ЭМП на один из выводов невозможно исключить ее воздействие на другие. Степень связи между ними, особенно для ИМС высокой степени интеграции, учесть сложно. Она зависит от конструкции корпуса микросхемы, ее включения в схему. Следствием этого является неопределенность эксперимента. Но она практически полностью устраняется, если имитировать ситуацию наихудшего случая, которой соответствует условие полного (или почти полного) поглощения подводимой мощности ЭМП в цепи исследуемого вывода. Исследуя изменения параметров ПП и ИМС при поочередной подаче радиопомех на все их выводы, можно определить наиболее восприимчивые из них. Методика испытаний значительно дешевле, результаты испытаний дают больше информации разработчикам аппаратуры.

На первом этапе исследований основное внимание уделялось изучению восприимчивости биполярных и полевых транзисторов, базового логического элемента (ЛЭ) И-НЕ, простейшего операционного усилителя (ОУ). Методика испытаний заключалась в анализе изменения вольтамперных характеристик диодов [6] (см. рис. 3) и транзисторов [7], передаточных характеристик ЛЭ (см. рис. 4) и ОУ. За критерий (порог) восприимчивости принимался уровень ЭМП, приводящий либо к сбою в работе схемы, либо к определенному изменению статических параметров ПП и ИМС.

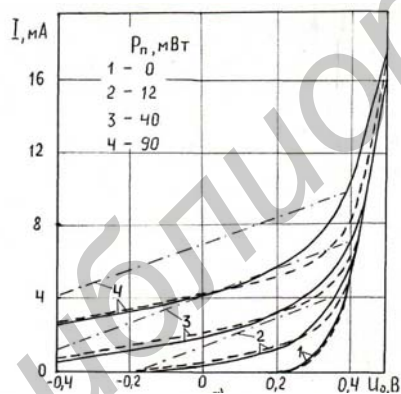


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные изменения характеристик диода Д9А под действием ЭМП с частотой 400 МГц

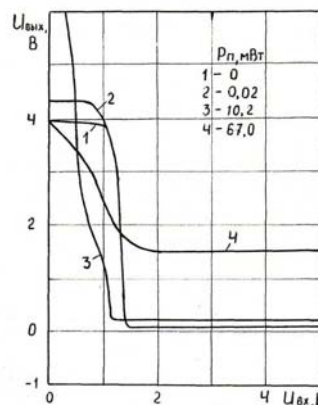


Рис. 4. Изменение передаточной характеристики ИС К155ЛА3 при воздействии на ее выход ЭМП с частотой 95 МГц

В ходе испытаний ИМС установлено, что целесообразнее оценивать их восприимчивость в динамическом режиме при подаче на вход тестовых рабочих сигналов [8]. В процессе исследований в БГУИР были разработаны и изготовлены несколько типов приборов, защищенных авторскими свидетельствами и патентом [9], предназначенных для измерения порогов восприимчивости, как простейших, так и более сложных ИМС. Исследуемая ИМС помещается в измерительную камеру, влияние помехи на другие цепи устройства исключается с помощью развязывающих фильтров. Изменение параметров исследуемой ИМС контролируется путем сравнения их с параметрами аналогичной эталонной микросхемы. Анализаторы восприимчивости могут работать как в ручном, так и в автоматическом режиме.

В зависимости от диапазона частот для измерения уровня воздействующей ЭМП могут быть использованы селективный ВЧ вольтметр, осциллограф или ваттметр поглощенной СВЧ-мощности. Блоки обработки и индикации построены таким образом, что позволяют исследовать восприимчивость как по критерию «достоверного сбоя», связанного с изменением выходного состояния ИМС, так и «вероятного сбоя», т.е. отклонения одного или нескольких параметров за допустимые пределы. Контроль может осуществляться одновременно по нескольким выходам исследуемой микросхемы.

На рис. 5, 6 представлены экспериментальные и расчетные зависимости восприимчивости некоторых транзисторов и цифровых микросхем. Результаты испытаний были использованы в специальных справочных пособиях для разработчиков радиоаппаратуры, работающей в сложной помеховой обстановке.

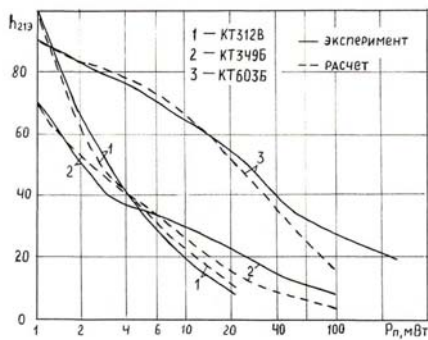


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные зависимости изменения коэффициента передачи по току биполярных транзисторов от уровня поглощенной мощности помехового сигнала с частотой 450 МГц, воздействующего по цепи базы

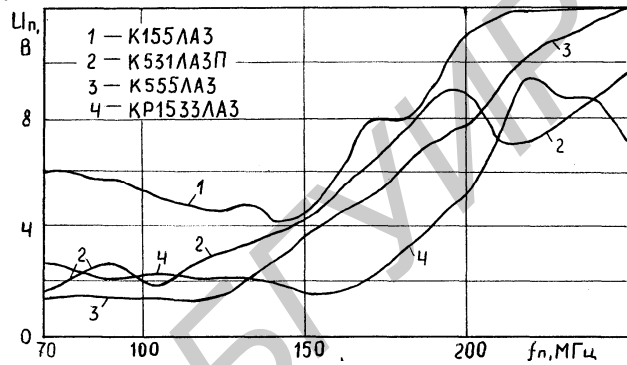


Рис. 6. Зависимость порога восприимчивости ТТЛ и ТТЛШ логических элементов И-НЕ от частоты радиопомехи, воздействующей на вход

Исследования различных типов диодов, транзисторов и ИМС [6–8, 10] показали:

- восприимчивость ПП и ИМС снижается с увеличением частоты воздействующих помеховых сигналов. На некоторых частотах могут наблюдаться резкие увеличения или уменьшения порога восприимчивости. Это объясняется влиянием паразитных индуктивностей и емкостей корпусов, а также особенностями включения ИМС;

- с ростом степени интеграции ИМС, т.е. с уменьшением размеров элементов и увеличением плотности их расположения, восприимчивость к воздействию помех растет. Так, при исследованиях БТ установлено, что менее восприимчивыми являются приборы с большим периметром эмиттера, т.е. имеющие встречно-штыревую конструкцию эмиттерного перехода;

- наиболее восприимчивы к воздействию радиопомех чувствительные схемы ОУ, маломощные БТ, быстродействующие цифровые ИМС. Более устойчивы к воздействию помех ПТ, КМОП ИМС, микросхемы с повышенной нагрузочной способностью;

- у микросхем различных серий динамика изменения параметров с ростом уровня помехового сигнала неодинакова. Так, в метровом диапазоне длин волн ЭМП у ЛЭ И-НЕ серии 155 (ТТЛ), 531 и 555 (ТТЛШ) чаще всего наступают недопустимые изменения динамических параметров – времени задержки распространения при выключении, в то время как у элементов серии 1533 (ТТЛШ) наиболее критичными к действию помех оказываются статические параметры: уровни логического нуля и единицы.

Накопленный учеными БГУИР за последние 25 лет опыт работы является хорошей базой для продолжения дальнейших исследований по данной тематике. Разработанная методика исследования ПП и ИМС может быть положена в основу экспериментов по оценке восприимчивости отдельных блоков и устройств в целом [10]. Систематизация полученных результатов позволяет использовать их не только в качестве справочных пособий для разработчиков современной радиоаппаратуры, но и как учебные материалы для подготовки специалистов в области ЭМС.

### Список литературы

1. Бригидин А.М., Титович Н.А., Кириллов В.М., и др. // Электронная техника. 1992. Вып. 1 (148). С. 3–13.
2. Mardiguian M. A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility. Vol. 5. Electromagnetic Control in Components and Devices. Virginia, 1988.
3. Авдеев В.Б., Авдеева Д.В., Бердышев А.В. // Информационное противодействие угрозам терроризма: Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет». 2011. № 16. С. 11–16.
4. Титович Н.А. // Тез. докл. науч.-технич. конф. «Современные проблемы радиотехники, электроники и связи». Минск, 1995. С. 189–191.
5. Титович Н.А., Ползунов В.В., Мурашкина З.Н. // Матер. XV Междунар. науч.-технич. конф. «Современные средства связи». Минск, 27–29 сентября 2011 г.
6. Титович Н.А., Бригидин А.М. // Радиотехника и электроника. 1992. Вып. 21. С. 157–160.
7. Титович Н.А. // Междунар. симп. по ЭМС: сб. науч. докладов. Санкт-Петербург, 1993. С.171–175.
8. Титович Н.А. // Радиотехника и электроника. 1991. Вып. 20. С. 84–87.
9. Титович Н.А., Буевич Е.А. Устройство для контроля параметров цифровых интегральных схем при воздействии электромагнитных помех / Патент РФ 2069865.
10. Титович Н.А., Ползунов В.В. / Матер. Междунар. НТК, посвящ. 45-летию МРТИ-БГУИР. Минск, 19 марта 2009 г. С. 73–74.