

УДК 621.1

А.Н. Козлов

АНАЛИЗ ДЕГРАДАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Обеспечение работоспособности систем управления и устройств вычислительной техники является одной из важнейших проблем на сегодняшний момент. Одним из факторов, снижающих работоспособность посредством вывода из строя элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, является СВЧ излучение. Обоснована актуальность данной проблемы и приведен краткий анализ деградационного воздействия СВЧ излучения, представлены ожидаемые параметры источников СВЧ излучения, приведены пути проникновения СВЧ излучения в корпуса радиоэлектронной аппаратуры. Кратко описан методический аппарат и некоторые результаты.

Цель статьи – обоснование актуальности проблемы защиты элементов и устройств вычислительной техники и систем управления различных объектов от воздействия мощного СВЧ излучения.

Известно, что импульсы СВЧ излучения большой мощности способны выводить из строя элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в первую очередь полупроводниковые [1]. Деградационные эффекты элементов РЭА могут быть обратимыми и необратимыми. В дальнейшем под термином «поражение» элемента будем понимать его необратимый отказ. Богатый инженерный опыт защиты РЭА от электромагнитного импульса (ЭМИ) ядерного взрыва мало пригоден для защиты от СВЧ излучения. Характер воздействия импульсов СВЧ излучения существенно отличается от характера воздействия электромагнитного импульса ядерного взрыва. ЭМИ не имеет высокочастотного заполнения (т.е. это видеоимпульс) и его спектр в основном сосредоточен в области относительно низких частот 1...100 МГц. СВЧ импульсы генерируются на определенной несущей частоте, а их спектр лежит в пределах от единиц до сотен гигагерц. Низкочастотный характер ЭМИ создает серьезные проблемы для его направленной канализации в пространстве на объект поражения, а для СВЧ излучения такая канализация легко реализуется с помощью антенных систем (рупорных, зеркальных, фазированных антенных решеток), что существенно

повышает уровень СВЧ мощности, действующей на РЭА. ЭМИ проникает непосредственно через стенки корпуса радиоэлектронной аппаратуры, в то время как СВЧ излучение может проникать в РЭА через отверстия, стыки и неоднородности корпусов, а также через открытые разъемы отрывных кабельных линий. Поэтому оценка деградационного воздействия СВЧ излучения на объекты, содержащие элементы и устройства вычислительной техники и системы управления, является важной и актуальной задачей.

Уровни энергии, достаточные для поражения (необратимой деградации) СВЧ излучением полупроводниковых элементов РЭА достаточно хорошо известны. В таблице 1 представлены известные экспериментальные данные о величине энергии, достаточной для поражения некоторых полупроводниковых элементов в зависимости от длительности СВЧ импульса [2-4].

Энергия поражения р-и-п диодов, используемых в ограничителях и антенных коммутаторах радиоэлектронных средств (РЭС), лежит в пределах $5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-4}$ Дж, при длительности импульса десятки наносекунд [4]. В ряде случаев выход из строя приемного модуля РЭС определяется отказом малошумящего усилителя, который в современной аппаратуре СВЧ-диапазона проектируется на основе полевого транзистора с затвором Шотки (ПТШ GaAs) [4]. Его энергия поражения приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Энергия поражения полупроводниковых приборов [Дж] при различных длительностях СВЧ-импульса [нс]

Полупроводн. приборы	Длительность СВЧ-импульса, нс		
	0,1 нс	10 нс	100 нс
Диоды: смесит. кремниев.	$2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-3}$
Гранз. ср. мощн.	$5 \cdot 10^{-5} - 0,01$	$5 \cdot 10^{-4} \dots 0,1$	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-1}$
ЦИМС: ТТЛ	$3 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$
МОП	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3} - 0,14$
АИМС	$3 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2} \dots 0,19$

Наиболее чувствительными, а значит и наиболее уязвимыми, элементами РЭС являются детекторные головки, в которых чаще всего используются смесительные диоды Д603 (в коаксиальных устройствах) и Д608 (в волноводных устройствах). Экспериментально полученные пороги перегорания смесительных диодов детекторных головок РЭС лежат в интервале 10-5...10-3 Дж, при длительности СВЧ импульса десятки наносекунд [2, 4]. Известно, что уровень энергии поражения в рабочем режиме ниже в 5...10 раз, а при воздействии импульсной последовательности уменьшается в 10...100 раз [2-8]. В таблице 2 представлены значения напряженности СВЧ поля, при которых наступает деградация микросхем различных типов [3, 4].

Таблица 2 – Уровни деградации интегральных микросхем

Степень деградации	Характер деградации	Тип ИМС	E_{II} , кВ/см	
			Пассив.	Актив.
I	Сбои функционирования	ТТЛ	8	0,3
		МОП		0,6
		Бип АИС		0,3-1,4
II	Устойчивые изменения параметров	ТТЛ	0,8-1,5	1,8
		МОП	0,5	0,1
		Бип АИС	1,2-15	4,0
III	Катастрофические необратимые отказы	ТТЛ	4	1,4-1,8
		МОП	2,5-15	0,1-4
		Бип АИС	1,4-5,5	1,0-6

Источником мощного СВЧ излучения могут являться мощные радиолокационные станции, а также СВЧ установки специального и военного назначения. На сегодняшний день мощность современных радиолокационных станций может достигать величины 100-1000 МВт.

В настоящее время широко обсуждается и используется термин «СВЧ-оружие» (в зарубежной печати также используется термин «микро-

волновое оружие») [1, 6-9]. Поражающим фактором СВЧ-оружия является импульсное электромагнитное излучение с длиной волны от 0,1 до 10 см. Испытания такого оружия и его элементов проводились США при проведении военных операций в Ираке [8, 9], однако такого оружия нет (пока) на вооружении ни у одного государства.

СВЧ-оружие разделяют на два вида: первый – СВЧ установки, второй – СВЧ боеприпасы. В свою очередь, СВЧ боеприпасы могут подразделяться на обычные и ядерные. В обычных СВЧ боеприпасах источником энергии является взрывомагнитный генератор на основе обычного взрывчатого вещества, а в ядерном – на основе ядерного заряда. Нагрузкой взрывомагнитного генератора является специальная генерирующая система, которая преобразует электрический импульс со взрывомагнитного генератора в импульс электромагнитного излучения СВЧ диапазона [1]. В СВЧ установках в качестве источника энергии могут использоваться емкостные накопители и взрывомагнитные генераторы с обычным взрывчатым веществом, а в качестве источника СВЧ излучения – генераторы на основе сверхмощных СВЧ приборов [4]. В таблице 3 приведены основные ожидаемые параметры СВЧ оружия, взятые на основе анализа источников [1-8].

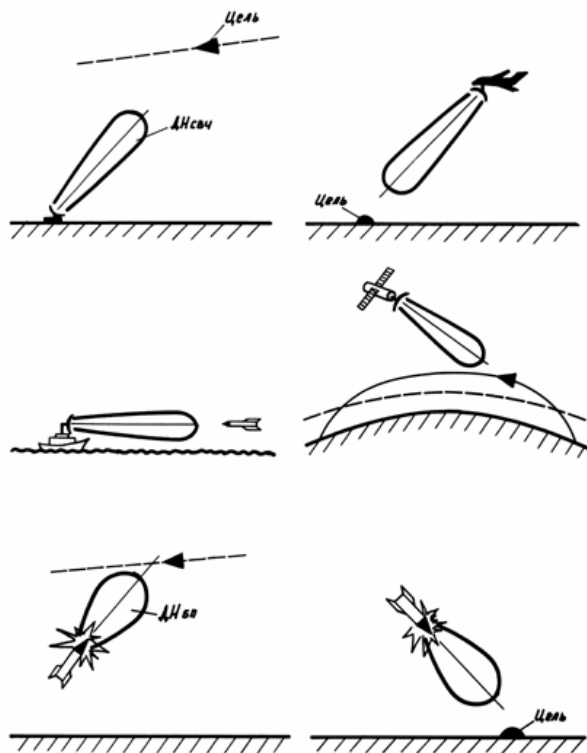
Таблица 3 – Ожидаемые параметры СВЧ оружия

Параметры СВЧ оружия	СВЧ устан.	СВЧ боепр.
Мощность в импульсе, ГВт	10...100	1...10
Длина волны излучения, см	0,1...10	
Длительность импульса, нс	5...100	
Длительность фронта импульса, нс	0,1...1	
КНД антенны	$10^3 \dots 10^7$	$10^2 \dots 10^3$
Частота следования импульсов, Гц	0...400	---

СВЧ-оружие может быть космического (воздушного) и наземного (морского) базирования, что обуславливает достаточно широкий спектр его применения. На рисунке изображены несколько типовых боевых ситуаций, которые можно разбить на два класса. Первый класс – характерный для СВЧ установок, второй – для СВЧ боеприпасов. Отличительной особенностью ситуаций первого класса является то, что главный максимум диаграммы направленности антенны СВЧ установки может быть точно на-

правлен на цель, например, с помощью РЛС обнаружения и наведения. Для ситуаций второго класса, т.е. для СВЧ боеприпасов, особенность заключается в том, что в момент его задействования возможно значительное отклонение главного максимума диаграммы направленности антенны СВЧ боеприпаса от точки цели, но при этом цель попадает в угол раствора диаграммы направленности СВЧ боеприпаса.

Пути проникновения СВЧ излучения в радиоэлектронную аппаратуру достаточно хорошо известны [2-8], однако механизмы проникновения не достаточно исследованы. СВЧ излучение может проникать в РЭА через антенно-фидерные устройства (АФУ), щели, отверстия и стыки в корпусах аппаратуры, через открытые разъемы, а также может непосредственно воздействовать через радиопрозрачные (пластиковые) элементы конструкции, например на заряды твердого топлива.



Типовые ситуации применения СВЧ оружия

Воздействие СВЧ излучения на РЭС цели через антенно-фидерное устройство можно оценить по его параметрам [1]. Проникновение СВЧ излучения в отверстия, щели и стыки корпуса – явление значительно более сложное для анализа. Известны результаты экспериментальных исследований проникновения СВЧ излучения через отверстия, которые показали, что максимум проникающей способности СВЧ излучения наблюдается при соблюдении резонансных условий, т.е. в том случае, когда размеры отверстий

кратны длине волны излучения. Проникающая способность резко уменьшается на волнах длиннее резонансной волны отверстия, но наблюдаются небольшие случайные пики на резонансных длинах волн проводников, находящихся внутри корпуса. На волнах короче резонансной длины волны отверстия наблюдается более медленный спад проникающей способности, но возникают острые резонансы благодаря множеству типов колебаний в объеме корпуса аппаратуры [1, 3].

Проникновение СВЧ излучения через разъемы и кабельные соединения сильно зависит от их конструктивных особенностей. Открытые штепсельные разъемы имеют существенные отличия от отверстий (наличие штырей, кабеля и т.д.). Сведений об анализе прохождения СВЧ излучения через разъемы крайне мало. Воздействие СВЧ излучения через открытые штепсельные разъемы отрывных кабельных соединений объектов авиационно-космической техники может привести к выходу из строя бортовой РЭА и других внутренних элементов, например элементов пироматериала. Однако в большинстве образцов авиационно-космической техники элементы бортовой РЭА не подвергаются непосредственному воздействию СВЧ излучения, так как находятся в составе экранированных узлов. В этом случае поражение элементов происходит под действием напряжений и токов, индуцированных в штырях открытых штепсельных разъемов и неэкранированных кабелях, которые электрически соединены с элементами РЭА. Теоретические оценки ослабления СВЧ излучения при проникновении через открытые штепсельные разъемы весьма затруднены вследствие большого числа влияющих факторов. В то же время необходимость и актуальность подобных теоретических и экспериментальных исследований велика. Это обусловлено наличием открытых штепсельных разъемов в современных образцах авиационно-космической техники. Известны результаты экспериментальных исследований и некоторого теоретического описания проникновения СВЧ излучения с длиной волны 3,2 см через некоторые штепсельные разъемы, используемые в авиационно-космической технике [5].

На основе анализа типовых образцов авиационно-космической техники можно заключить, что для таких объектов основными путями проникновения СВЧ излучения являются:

- 1) антенно-фидерные устройства бортовых радиоэлектронных средств;
- 2) открытые штепсельные разъемы бортовой РЭА и отрывных кабельных соединений;

3) радиопрозрачные элементы конструкции корпусов как самих объектов, так и аппаратуры.

Основой методического аппарата для оценки уровня гарантоспособности вычислительных систем и систем управления авиационно-космической техники в условиях воздействия СВЧ излучения (СВЧ-оружия) является разработанная вероятностная модель, которая состоит из четырех взаимосвязанных вероятностных моделей. Первая – вероятностная модель ослабления излучения СВЧ-оружия при распространении в атмосфере, которая учитывает случайный характер погодных условий и параметров атмосферы. Модель позволяет получить закон распределения коэффициента ослабления и использовать его в вероятностных моделях для определения величин нагрузок. Под нагрузкой понимается параметр, характеризующий поражающее действие СВЧ-оружия на критический(ие) элемент(ы) РЭА и других функциональных узлов вооружения и военной техники.

Вторая модель – вероятностная модель воздействия СВЧ излучения через АФУ РЭС цели, которая учитывает частотную избирательность элементов АФУ при внеполосовом воздействии СВЧ оружия. При разработке модели был принят антенный механизм взаимодействия и использована теория радиоприема. В этом случае СВЧ источник рассматривается как передатчик, а цель – как приемник СВЧ излучения. Получено выражение для расчета величины нагрузки, действующей на критический элемент. Методом статистического моделирования определяется закон распределения нагрузки, который используется для расчета показателя эффективности поражающего действия СВЧ излучения.

Третья модель – это вероятностная модель воздействия СВЧ излучения через открытые штепсельные разъемы объектов вооружения и военной техники позволяет определить законы распределения нагрузок при воздействии через разъем. При этом используются полученные эмпирические зависимости для расчета коэффициента ослабления разъема и экспериментально полученная поправка для расчета диаграмм направленности штырей разъема [9]. Для определения закона распределения нагрузок используется метод статистического моделирования.

В результате корреляционного анализа выделены значимые параметры, которые используются в вышеуказанных моделях как случайные величины.

В качестве четвертой модели используется адаптированная вероятностная модель "Нагрузка-Стойкость" [10]. Она позволяет рассчитать величину показателя эффективности поражаю-

щего действия СВЧ излучения. В качестве показателя эффективности поражающего действия принята вероятность функционального поражения цели, которая характеризует уровень гарантоспособности цели, в частности, ее радиоэлектронной аппаратуры.

На основе общей вероятностной модели разработана методика построения зоны функционального поражения цели, которая учитывает направленные свойства СВЧ источника и другие его особенности. Под зоной поражения понимается область пространства, в которой цель поражается с вероятностью не ниже заданной. Основными параметрами СВЧ-оружия, определяющими размеры зоны поражения при его постоянных энергетических характеристиках, являются: для СВЧ установок – ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны и точность наведения ее на цель. Для СВЧ боеприпаса дополнительно к ним – отклонение точки подрыва от точки прицеливания. Также в качестве примера был рассчитан радиус поражения радиолокационной головки самонаведения противокорабельной крылатой ракеты «Тамагавк» BGM-109 с помощью СВЧ установки, размещенной на корабле. Радиус поражения с вероятностью 0,95 составляет от 4 до 4,5 км, следовательно, уровень гарантоспособности на данном расстоянии составляет 0,05.

Разработанная вероятностная модель может являться основой методического аппарата:

- для обоснования рекомендаций по выбору основных параметров СВЧ-оружия и его применению для достижения заданной эффективности поражения цели;

- для оценки эффективности поражающего действия СВЧ-оружия на любые образцы авиационно-космической техники, содержащие РЭА;

- для оценки стойкости авиационно-космической техники и различных систем к действию СВЧ излучения;

- для обоснования величины показателя стойкости к действию СВЧ-оружия и СВЧ излучения;

- для обоснования требований к испытательной базе экспериментального исследования стойкости элементов и устройств образцов авиационно-космической техники и систем к действию СВЧ излучения.

Библиографический список:

1. Keith Florig H. The future battlefield: A blast gigawatts? – IEEE Spectrum, March 1988, pp. 50-54.
2. Панов В.В., Саркисян А.П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения. // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. N 10,11,12.

3. Магда И.И., Блудов С.В. и др. Исследование физических процессов деградации изделий электронной техники в мощных электромагнитных полях.. – Материалы 3-й Крымской конференции "СВЧ техника и спутниковый прием". Севастополь. 1993, Том 5.

4. Антитин В.В., Годовицын В.А. и др. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. N 1.

5. Kozlov, A. Rybacov, V. Pashkevich. Penetration of microwaves into nonuniformly screened spaces.// Latvian journal of physics and technical sciences. ISSN 0868-8257. №4, 2000. с.31-38.

6. Michael Abrams. The Dawn of the E-Bomb. <http://vrtp.ru/index.php?act=categories&CODE=article&article=783>

7. Рухадзе А.А. Мифы и реальность. О лучевом оружии в России. (О целях и возможностях их достижений) //«Академия Тринитаризма», М., Эл № 77-6567, публ. 11374, 28.07.2004.

(<http://www.trinitas.ru/rus/doc/0016/001b/00160112.htm>)

8. «Безвредное» оружие, которое США хотят применить в Ираке, может оказаться чрезмерно вредным.

(<http://www.inauka.ru/news/article55125.html>)

9. Северский А. Опасные опыты над иракцами. США испытывают СВЧ - оружие (<http://www.inforos.ru/?id=8571>).

10. Канур Л., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 604 с.