

УДК 621.396

Н.С. Антоненко<sup>1</sup>, И.И. Сачук<sup>2</sup><sup>1</sup> Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков<sup>2</sup> Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

*Проанализированы особенности защиты радиотехнических систем от мощных электромагнитных излучений. Приведены особенности построения, достоинства и недостатки существующих типов защитных устройств. Предложен новый подход к построению защитных устройств на основе образования в волноводе плазменного промежутка с использованием радиоактивного вещества.*

**Ключевые слова:** радиотехнические системы, защитные устройства, мощные электромагнитные излучения.

### Постановка проблемы

Надежность и работоспособность радиотехнических систем в значительной степени определяется чувствительностью к кратковременным перегрузкам, возникающим в результате переходных процессов, основными источниками которых являются различные устройства (индукторы, моторы, генераторы, реле и др.), разряды статического электричества и наведенные электромагнитные импульсы иной природы. В настоящее время как в гражданских радиолокационных, связных и навигационных комплексах, так и в военных активных и пассивных радиолокационных системах обнаружения и автоматического распознавания наземных и воздушных объектов используется и предполагается широкое применение защитных устройств (ЗУ), которые предназначены для защиты входных трактов приемников от больших уровней СВЧ мощности своих и "чужих" передатчиков [1].

Зондирующий или передаваемый сигнал в связных и навигационных системах попадает сначала в ретранслятор, находящийся, например, на спутнике, который формирует ответный сигнал, как правило, на другой частоте. Наличие в антенно-фидерном устройстве диплексера решает задачу защиты приемника от собственного передатчика. По этой причине в стационарных системах спутниковой связи и навигации ЗУ чаще всего не ставятся. Однако локационные и связные комплексы в условиях преднамеренно созданных помех также нуждаются в ЗУ. Нуждаются в защитных устройствах и приемники всех без исключения летательных аппаратов.

Защитные устройства, защищающие вход приемника от собственного передатчика, могут управляться подачей на них управляющего сигнала, синхронизированного с сигналом передатчика. Реализация автономных ЗУ осложняется в сравнении с управляемыми ЗУ тем, что они должны срабатывать под действием мощного СВЧ сигнала, для чего требуется более тонкая (например, полупроводниковая) структура. Автономные ЗУ там, где возможно, используются вместо управляемых ЗУ, так как при этом повышается надежность защиты.

Современная технология изготовления полупроводниковых транзисторов, используемых во входном каскаде приемного устройства, позволяет достигнуть уменьшения расстояния между их электродами, необходимого для реализации малой шумовой температуры. Однако это снижает допустимый уровень падающей на входной каскад приемника СВЧ мощности, составляющей в настоящее время единицы мВт. С другой стороны, наличие сверхмощных импульсных генераторов, которые потенциально могут быть применены в качестве источников сигнала [2 – 5], обуславливает необходимость создания ЗУ, выдерживающих воздействие импульсной СВЧ мощности, доходящей до единиц кВт и непрерывной СВЧ мощности – до нескольких сотен Ватт.

Выполнение таких требований особенно сложно в верхней части частотного диапазона (в настоящее время это сантиметровый и миллиметровый диапазоны, а в перспективе – субмиллиметровый диапазон), в котором работают радиолокационные и связные устройства. При этом также необходимо обеспечить малые потери, вносимые ЗУ, так как в противном случае нецелесообразно снижать коэффициент шума приемника за счет использования на его входе слишком уязвимого транзистора. Типичные требуемые потери ЗУ не превышают 0,5–2,5 дБ в зависимости от значения рабочей частоты. Важными параметрами ЗУ являются ограничение по энергии пика просачиваемой мощности, лежащее в пределах 10–20 нДж, и время восстановления ЗУ после окончания воздействия на него большой СВЧ мощности, определяющее дальность мертвой зоны при локации, которое составляет десятки-сотни наносекунд.

### Характеристика применяемых защитных устройств

Среди множества СВЧ защитных устройств можно выделить три наиболее применяемых типа: газоразрядные ЗУ, полупроводниковые ЗУ, а также их комбинации, и вакуумные ЗУ.

Газоразрядные ЗУ делят на коаксиальные и волноводные. Они выпускаются во многих вариантах

и могут отличаться по допустимой входной мощности и по просачивающейся мощности. В зависимости от этого различают разрядники предварительной и окончательной защиты приемника.

Основным недостатком газоразрядных ЗУ является их малая скорость срабатывания (большое время восстановления, определяемое временем рассеивания плазмы газового разряда после окончания импульса воздействующего излучения). Другой недостаток – большое потребление мощности, обусловленное недостаточно высокой проводимостью газового разряда. Третий недостаток газоразрядных приборов заключается в том, что при возникновении разряда возникает выброс напряжения, обусловленный индуктивностью выводов, а также временем задержки между приложением переходного сигнала и началом лавинного пробоя промежутка. Энергия выброса может оказаться достаточной для остаточного повреждения чувствительного элемента приемника. В настоящее время темпы совершенствования газоразрядных ЗУ существенно снизились и едва ли можно ожидать в их развитии большого скачка.

С появлением полупроводниковых ЗУ оказалось возможным дополнить каскады газоразрядных ЗУ каскадами полупроводниковых ЗУ, в которых удается уменьшить энергию пика просачивающейся мощности благодаря их увеличенному быстродействию. Такие комбинированные ЗУ в настоящее время являются основным типом ЗУ. Полупроводниковые ЗУ, благодаря их высокой надежности и быстродействию, получили наибольшие возможности для совершенствования. Изобретение "подпитки" в полупроводниковых ЗУ открыло возможность создания комбинированных газоразрядно-полупроводниковых ЗУ, в которых удельный вес полупроводниковых каскадов был бы более значительным.

Другой путь совершенствования ЗУ заключается в поиске таких решений, которые могли бы резко увеличить допустимую входную СВЧ мощность без потери других важных параметров ЗУ (в первую очередь быстродействия и вносимых потерь в рабочей полосе частот). За три последних десятилетия возник целый ряд оригинальных решений, в которых использовалось параллельное, последовательное и параллельно-последовательное включение нескольких диодных структур по СВЧ току в поперечном и продольном сечении волновода [6]. При последовательном включении диодов по СВЧ току [7, 8] можно, не меняя диодной структуры, увеличить емкость диода пропорционально числу диодов в последовательной цепи. Параллельное включение диодных структур [9, 10] (особенно при попытке продвижения в миллиметровый диапазон длин волн) не выгодно из-за уменьшения импеданса ансамбля из нескольких диодов. Последовательно-параллельное включение позволяет распределить поглощенную в режиме защиты СВЧ мощность между многими диодными структурами, сохранив импедансные свойства однодиодного ЗУ. Последовательно-параллельные включения диодов, получившие название "резонансные решетки", хорошо зарекомен-

довали себя в качестве каскадов, непосредственно стоящих за газоразрядными ЗУ [11, 12]. Хороший теплоотвод от диодных структур, устанавливаемых на боковых стенках, выступающих в волновод, и равномерное распределение тока между ними обеспечивают повышение допустимой падающей мощности в первом приближении пропорциональное числу диодов. Процесс поиска удачных решений для полупроводниковых ЗУ продолжается, хотя в определенной степени чувствуется насыщение в этом направлении. Среди полупроводниковых ЗУ следует отметить так называемые [13 – 15] "полурешетки", которые могут быть полезным для создания ЗУ со многими последовательно включенными структурами.

Возможное увеличение числа диодных рп-структур, между которыми при правильном построении равномерно распределяется СВЧ мощность, на некоторое время породило иллюзию об избавлении в ЗУ от газоразрядных каскадов и требуемом увеличении быстродействия. Однако многодиодным ЗУ присущи принципиальные, непреодолимые в настоящее время недостатки. Во-первых, трудно выполнить размещение в волноводе очень большого числа диодов с одинаково хорошим теплоотводом, что уменьшает эффективность увеличения их числа. Во-вторых, при любых комбинациях включения диодов выход из строя одного из них приводит к неравномерному распределению поглощенной СВЧ мощности остальными диодами и тем самым запускает лавинообразный процесс разрушения всего ЗУ. В-третьих, причиной выхода из строя одного из многих диодов является неидентичность параметров диодов, в особенности, если они не изготовлены в едином технологическом цикле, наподобие большого матричного кристалла. В-четвертых, недостатком полупроводниковых ограничителей всех видов является большая междуэлектродная емкость, что ограничивает их применение в цепях высокой частоты. Для его устранения последовательно с этими приборами включают малоемкостные импульсные диоды. Но применение последних совместно с ограничительными диодами снижает быстродействие защитного устройства примерно в  $10^3$  раз [16].

Вакуумные защитные устройства появились как попытка создать сверхбыстродействующие ЗУ, способные реагировать на сверхмощные импульсные воздействия с наносекундными фронтами импульса. Первые вакуумные ЗУ появились в 60-х годах [17] и получили название "защитные устройства на основе вторично-электронного резонанса" (ВЭР). Последние попытки усовершенствования таких ЗУ относятся к 70-м годам. При бесспорном их достоинстве – высокой быстродействии (менее 15 нс в 3-см диапазоне длин волн) им свойственны недостатки, которые оказались слишком трудно преодолимыми: узкополосность, большое потребление СВЧ мощности, нагрев резонаторов и трудность поддержания вторичной эмиссии при большой плотности СВЧ тока.

В настоящее время ЗУ на основе ВЭР пока вытеснены сравнительно новыми вакуумными ЗУ, получившими название циклотронных защитных уст-

роїств [18, 19], которые выпускаются промышленностью в комплекте с твердотельными малошумящими усилителями. Быстродействие таких ЗУ не превышает 20 нс. При этом в диапазоне длин волн 3 – 4 см максимальная допустимая мощность в импульсе – не менее 10 кВт при средней мощности 300 Вт.

### Новый подход к построению защитных устройств

В соответствии с изложенным выше, применяемые в радиотехнических системах защитные устройства имеют ряд недостатков, которые принципиально не могут быть устранены. В качестве подхода к построению защитных устройств предлагается использование в волноводе радиоактивного вещества, создающего промежуток слабоионизированной среды, которая при действии высокого уровня СВЧ мощности, поступающей на вход радиотехнической системы, преобразуется в сильноионизированную среду, замыкающую входную СВЧ мощность. Защитные устройства, реализующие этот подход, принципиально лишены большинства указанных выше недостатков. Для практического подтверждения целесообразности использования защитных устройств, реализующий предложенный подход, необходимо решить ряд задач: разработать модель прохождения СВЧ импульса сквозь газовую среду, оценить параметры используемого радиоактивного вещества и создаваемой им ионизированной среды, разработать модель устройства защиты с использованием радиоактивного вещества и провести экспериментальное исследование разработанного устройства.

### Выводы

Обоснована необходимость использования в радиотехнических системах защитных устройств. Дана детальная характеристика достоинств и недостатков применяемых защитных устройств, показывающая принципиальную невозможность обеспечения требуемого уровня защиты. В качестве подхода к построению защитных устройств предложено использовать в волноводе радиоактивное вещество, создающее промежуток слабоионизированной среды, и сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для разработки защитных устройств, реализующих предложенный подход.

### Список литературы

1. Алыбин В.Г. Проблемы создания СВЧ защитных устройств для радиолокации и связи / В.Г. Алыбин // 12<sup>th</sup> Int. Crimean Conference "Microwave Telecommunication Technology", 2002. – 9-13 September. – P. 15-21.
2. Силкин А.И. Универсальные бесплотники / А.И. Силкин, А.Б. Бренер, А.В. Дробышевский // Независимое военное обозрение. – 2003. – №4. – С. 4.

3. Таран Е.П. Динамика деградационных процессов в интегральных микросхемах / Е.П. Таран, В.В. Старостенко // Материалы Крымской микроволновой конференции, 1996. – С. 437-440.

4. Studies on Electromagnetic Radiation of Ultrashort Duration Pulse Interference on UHF Electronic Devices / N.P. Gadetski, K.A. Kravtsov, I.I. Magda et al. – AMEREM'96, Abstracts, Albuquerque, New Mexico, 1996. – P. 79.

5. Магда И.И. Воздействие импульсивных сигналов на автоколебательные системы / И.И. Магда, Р.В. Шаповал // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2003. – Вип. 1(23). – С. 120-126.

6. Лебедев И.В. Квазиактивный защитный ограничитель СВЧ мощности / И.В. Лебедев, М.В. Семенча // Радиотехника. – 2001. – №2. – С. 17-21.

7. Butson P.S. Useful microwave hybrid circuit / P.S. Butson, G.T. Thompson // Proc. IEEE, 1964. – V.111, №7. – P. 1281-1282.

8. Либерман Л.С. Полупроводниковые диоды для управления СВЧ мощностью / Л.С. Либерман, Б.В. Сестрорецкий, В.А. Шпирт и др. // Радиотехника. – 1972. – Т.27, №5. – С. 9-24.

9. Авторское свидетельство №1042110, кл. НО1Р 1/15 / А.В. Кириллов, Е.В. Карчевский (СССР). – 1982.

10. Патент США №3649935. Active irises and windows / Ramay R.L.; 1972.

11. Авторское свидетельство 3566297 (СССР). Устройство сложения мощностей СВЧ приборов / И.В. Лебедев, В.Г. Алыбин. Опул. 1977. – БИ №27.

12. Лебедев И.В. Резонансная решетка и ее применение для создания СВЧ устройств / И.В. Лебедев, В.Г. Алыбин // Известия Вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1978. – Т.21, №10. – С. 24-31.

13. Авторское свидетельство №1737571 (СССР), МКИ НО1Р 1/15. Ограничитель СВЧ мощности / И.В. Лебедев, Л.В. Угничев, Д.В. Скоробогатов и др. // Открытия. Изобретения, 1992. – №20.

14. Авторское свидетельство №1827041 (СССР) МКИ НО1Р 1/15. Ограничитель СВЧ мощности / И.В. Лебедев, Л.В. Угничев, Д.В. Скоробогатов // Открытия. Изобретения, 1992. – №20.

15. Патент №1827041 (СССР), МКИ НО1Р 1/22. Ограничитель СВЧ мощности / Прохоров Р.А., Лебедев И.В., Скоробогатов Д.В. // Открытия. Изобретения, 1993. – №25.

16. Кондратьев Б.В. Ограничители для защиты радиоэлектронной аппаратуры от перенапряжения / Б.В. Кондратьев, Б.В. Попов // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. – 1985. – Т.28, №10. – С. 42-94.

17. Forrez M. Duplexing and switching with multipactor discharge / M. Forrez, C. Milazzo // Proceeding of IRE. – 1962. – №4. – P. 442-451.

18. Будзинский Ю.А. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.П. Кантюк и др. // Радиотехника. – 1999. – №4. – С. 32.

19. Будзинский Ю.А. Комплексированные усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильдманов и др. // XI Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2001. – С. 190-191.

Поступила в редколлегию 8.12.1008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Сахацкий, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

### МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ ЗАХИСТУ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ВІД ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ

Н.С. Антоненко, І.І. Сачук

Проаналізовано особливості захисту радіотехнічних систем від потужних електромагнітних імпульсів. Приведено особливості побудови, переваги та недоліки існуючих типів пристроїв захисту. Запропоновано новий підхід до побудови пристроїв захисту на основі створення у хвилеводі плазмового проміжку з використанням радиоактивної речовини.

**Ключові слова:** радіотехнічні системи, пристрої захисту, потужні електромагнітні випромінювання.

**THE METHODS AND DEVICES OF DEFENCE OF RADIO SYSTEMS AGAINST HIGH-POWERED  
ELECTROMAGNETIC PULSES**

N.S. Antonenko, I.I. Sachuk

*Peculiarities of radio system defence against high-powered electromagnetic pulses are analysed. Peculiarities of construction, advantages and disadvantages of existing types of defence devices are described. New approach to constructing defence devices that are based on formation of plasma gap in waveguide by radioactive material is devised.*

**Keywords:** radio systems, defence devices, high-powered electromagnetic pulses.