

УДК 621.396.6

И.А. Капура, Г.Ф. Коняхин, А.М. Сотников

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЭМИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*Показано, что перспективным в настоящее время при проектировании защитных устройств входных цепей приемного СВЧ тракта является использование высокотемпературных сверхпроводников вследствие их низкого поверхностного сопротивления. Метод защиты РЭА от воздействия ЭМИ осуществляется за счет резкого увеличения сопротивления ЗУ на несколько порядков при переходе защитного устройства в нормальное фазовое состояние, что равноценно разрыву фидерной линии передачи.*

**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, микрополосковая линия, копланарная линия, пороговая мощность, защитное устройство.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

В настоящее время в технологически развитых странах мира наблюдается интенсивная работа по разработке и созданию генераторов [1 – 3], обладающих мощностью излучения порядка 1 ГВт и выше. Наиболее опасным по своему воздействию на радиоэлектронную аппаратуру является мощное электромагнитное излучение короткой и ультракороткой длительности импульса (УКДИ), способное обеспечить выведение из строя радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) на расстояниях от десятков до сотен километров. Поэтому проблема обеспечения стойкости и надежности современных радиоэлектронных средств к воздействию мощных электромагнитных излучений короткой и ультракороткой длительности импульса имеет ярко выраженный системный, комплексный характер, как в техническом, так и в организационном отношении. Это обусловлено тем, что влияние ЭМИ выражается не только непосредственным воздействием полей на элементы и узлы радиоаппаратуры, но и воздействием импульсных напряжений и токов, наводимых электромагнитным полем (ЭМП) в проводах и кабелях, на элементы входов радиоэлектронной аппаратуры.

Анализ доступной литературы [4 – 6], посвященной методам и способам защиты РЭА от воздействия электромагнитных импульсов (ЭМИ), показал, что в настоящее время отсутствуют эффективные средства защиты радиоэлектронных средств от мощных электромагнитных излучений. Кроме того, нет систематизированных данных относительно теоретических исследований и количественных оценок по снижению влияния мощных электромагнитных излучений ультракороткой длительности (УКДИ) на работоспособность радиоэлектронных средств в условиях воздействия этих излучений.

**Целью данной статьи** является разработка метода защиты РЭА от воздействия мощных электро-

магнитных импульсов ультракороткой длительности, основанного на использовании переключающих свойств высокотемпературных сверхпроводников.

### Основная часть

#### 1. Защитные устройства на основе ВТСП

Наиболее перспективным в настоящее время при проектировании защитных устройств входных цепей приемного СВЧ тракта является использование высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) вследствие их низкого поверхностного сопротивления. Малое поверхностное сопротивление, а, следовательно, и малые потери, позволяют достичь очень высоких значений добротности устройства на ВТСП. Отсутствие частотной зависимости глубины проникновения поля в сверхпроводник приводит к тому, что они не увеличивают дисперсию устройств (определять дисперсионные свойства будет геометрия конструкции и входящие в нее диэлектрики).

Параметром, непосредственно определяющим высокочастотные свойства ВТСП материалов, является их поверхностное сопротивление. В обычных металлах поверхностное сопротивление увеличивается пропорционально квадратному корню из частоты, тогда как у сверхпроводников – пропорционально ее квадрату. Но так как начальное значение поверхностного сопротивления (на постоянном токе) у ВТСП материалов, находящихся в сверхпроводящем состоянии, на несколько порядков ниже, чем у металлов, высококачественные сверхпроводники сохраняют преимущество по сравнению с последними при частотах до нескольких сотен гигагерц.

Основное достоинство ВТСП-проводников для СВЧ или импульсной техники – способность проводить ток высокой плотности без заметного нагревания. Тонкие ВТСП-пленки позволяют формировать линии передачи различной конфигурации. При равенстве остальных параметров наиболее предпочтительна полосковая линия, так как она бездисперсион-

на, по крайней мере, до миллиметровых волн. Однако при ее создании необходимо нанести три проводящих слоя, разделенных диэлектриками. Микрополосковая и копланарная линии обладают дисперсией, зато при их изготовлении ВТСП-пленка осаждается только на одну сторону единственной диэлектрической подложки. Копланарная линия наиболее проста в изготовлении – для нее нужен всего один ВТСП-слой [7].

С использованием ВТСП материалов возможна реализация защитных устройств (ЗУ) радиоэлектронной аппаратуры, принцип действия которых основан на переключении пленки из сверхпроводящего состояния (S) в нормальное (N) и обратно, так называемое  $S \leftrightarrow N$  переключение. Принципиально важной является возможность  $S \rightarrow N$  переключения за время  $\tau < 1$  нс. На рис. 1 приведено защитное устройство для защиты входных цепей радиоприемника.

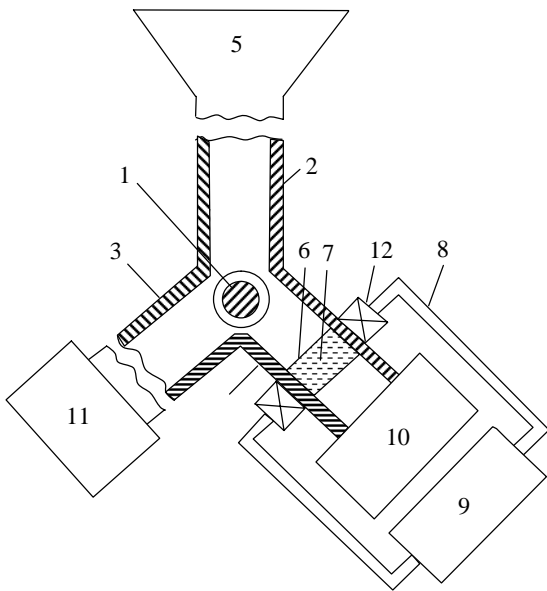


Рис. 1. Устройство для защиты приемника

Устройство для защиты приемника состоит из переключаемого ферритового циркулятора на основе трехплечного волноводного Y-циркулятора 1, где к входу первого плеча 2 циркулятора 1 подключена антенна 3, к выходу второго плеча 4 подключена поглощающая нагрузка 5, а к выходу третьего плеча 6 подключен приемник 7. Внутри второго плеча 4 установлены две параллельные пластины 8, выполненные из высокотемпературного сверхпроводника, например, типа  $YBa_2Cu_3O_7$  толщиной более толщины скин-слоя в этом сверхпроводнике. Пространство между пластинами 8, прилегающими к стенкам волноводного плеча 4, заполнено жидким азотом 9, поступающим по трубам 10 от криогенного генератора 11 замкнутого цикла. Второе плечо 4 в области расположения пластин 8 помещено внутрь соленоида 12.

Устройство для защиты приемника работает следующим образом. Вначале объем между пластинами 8 заполняется жидким азотом 9, поступающим

по трубам 10 от криогенного генератора 11 замкнутого цикла. Замкнутый цикл работы уменьшает вес системы охлаждения и повышает ее КПД. Под действием жидкого азота 9 пластины 8 становятся сверхпроводящими. При приходе на антенну 3 маломощного сигнала, несущего информацию, сигнал, согласно принципу действия циркулятора 1, поступает во второе плечо 4. Так как пластины 8 выполнены из высокотемпературного сверхпроводника, то информационный сигнал отражается от них и поступает в третье плечо 6 и по нему в приемник 7. При приеме антенной мощного импульсного электромагнитного излучения (например, преднамеренной помехи), превышающего уровень мощности перехода сверхпроводящих пластин в нормальное состояние, это излучение поступает в плечо 4 и разрушает сверхпроводимость пластин 8, переводя их в несверхпроводящее (нормальное) состояние. Пластины 8 будут прозрачны для мощного помехового сигнала, который по плечу 4 поступает в поглощающую нагрузку 5 и не попадает в третье плечо. Кроме того, сами пластины 8 с разрушенной сверхпроводимостью также будут поглощать мощность электромагнитного излучения [8]. При прекращении воздействия мощного излучения сверхпроводимость пластин 8 мгновенно восстанавливается, и приемник 7 вновь работает в нормальном режиме, принимая информационный сигнал.

Таким образом, защита приемника осуществляется автоматически при разрушении сверхпроводимости пластин 8 за счет энергии самого же мощного излучения, причем время перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное и наоборот составляет менее  $10^{-12}$  с. Регулировка по уровню защищаемой мощности производится изменением величины напряженности магнитного поля, создаваемой соленоидом 12.

На основании рассмотренного выше устройства можно в общем виде сформулировать метод защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных излучений ультракороткой длительности импульсов.

## 2. Метод защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных импульсов ультракороткой длительности

Сверхпроводящие защитные устройства могут быть выполнены в виде любой линии передачи (полосковой, коаксиальной, волноводной систем и т.д.). Однако, несмотря на различия в конструктивном исполнении, основой такого защитного устройства является высокотемпературный сверхпроводник (тонкая ВТСП пленка), расположенный на диэлектрической подложке. Очевидно, что фазовое состояние сверхпроводящих защитных устройств определяется фазовым состоянием тонкой ВТСП пленки. Поэтому можно сформулировать общий принцип метода защиты РЭА, характерный для любого сверхпроводящего защитного устройства.

При приеме антенными устройствами информационных сигналов через ЗУ (тонкую ВТСП пленку) протекает транспортный ток, что обеспечивает пребывание защитного устройства в сверхпроводящем фазовом состоянии. При этом формирование нормальных областей на краях тонкой пленки не вызывает разрушение сверхпроводимости, так как их ширина не превышает величину глубины проникновения  $\lambda_1$  для данного сверхпроводника. ЗУ не препятствует прохождению сигнала через фидерный тракт к входным цепям приемного устройства. В случае приема антенными устройствами мощного электромагнитного излучения ток, протекающий через защитное устройство, включенное в разрыв линии передачи, превышает значение критического тока  $I_{c1}$ , что приводит к увеличению объема нормальных областей на краях тонкой пленки и разрушению сверхпроводимости (смешанное состояние). Достижение током значения критического тока  $I_{c2}$  означает автоматический переход ЗУ в несверхпроводящее (нормальное) фазовое состояние. При этом защита РЭА от воздействия ЭМИ осуществляется за счет резкого увеличения сопротивления ЗУ на несколько порядков, что равноценно разрыву фидерной линии передачи. В этом случае мощный электромагнитный импульс не проходит во входные цепи приемного устройства, что не вызывает выхода из строя чувствительных элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Основным параметром, характеризующим расхождение линии передачи защитными устройствами, является их волновое сопротивление в сверхпроводящем, смешанном и нормальном состояниях.

Анализ исследований, проведенных в работах [9 – 11], показал, что технологическое исполнение сверхпроводящих защитных устройств, построенных на основе коаксиальных или волноводных линий передачи на данный момент достаточно затруднительно. Это связано, прежде всего, с высокой чувствительностью тонких ВТСП пленок к термо- и механическим воздействиям, возникающим в ходе выполнения технологических процессов, направленных на создание ЗУ. Кроме того, необходимость максимального ослабления входного сигнала приводит к значительному увеличению массы и габаритных размеров таких защитных устройств.

В этом отношении сверхпроводящие защитные устройства, построенные на основе полосковых линий передачи, могут быть изготовлены сравнительно простыми технологическими методами, не допускающими серьезных воздействий на тонкую ВТСП пленку. При этом такие защитные устройства допускают высокую степень интеграции и обладают сравнительно небольшими габаритными размерами и массой при сохранении достаточно высокой электрической прочности.

## Выводы

1. При проектировании защитных устройств входных цепей приемного СВЧ тракта перспективным в настоящее время является использование высокотемпературных сверхпроводников вследствие их низкого поверхностного сопротивления.

2. Разработан метод защиты РЭА от воздействия ЭМИ, который осуществляется за счет резкого увеличения сопротивления ЗУ на несколько порядков при переходе защитного устройства в нормальное фазовое состояние, что равноценно разрыву фидерной линии передачи.

3. Защитные устройства, построенные на основе микрополосковых линий передачи, могут быть изготовлены сравнительно простыми технологическими методами, не допускающими серьезных воздействий на тонкую ВТСП пленку.

## Список литературы

1. Панов В.В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения / В.В. Панов, А.П. Саркисян // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1993. – № 10, 11, 12.
2. Исследование физических процессов деградации изделий электрон-ной техники в мощных электромагнитных полях.. / И.И. Магда, С.В. Блудов и др. // *Мат-лы 3-й Крымской конф. "СВЧ техника и спутниковый прием"*. – Севастополь, 1993. – Том 5.
3. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В.В. Антипин, В.А. Годовицши и др. // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1995. – № 1. – С. 24-28.
4. Кириллов А.В. Широкополосные полупроводниковые защитные устройства 8-мм диапазона / А.В. Кириллов, В.А. Смирнов, Л.П. Романов // *Мат-ли конф., Севастополь 12-16 сентября, 2005*. – С. 183-184.
5. D.G. Smith et al. -Designing high-power limiter circuits with GaAs pin diodes, *IEEE MTT-S int. Microwave Simp. Digest*, 1999. – P. 329-332.
6. Крутов А.В. Монолитная интегральная схема защитного устройства 3-см диапазона / А.В. Крутов, А.С. Ребров. – *15th Int. CriMiCo*, 2005. – С. 177-178.
7. *Applied Physics Letters*, 1993, v. 62. – P. 1435-1437. – для КПЛ.
8. Щербачев А.С. и др. // *Письма в ЖЭТФ*, 1987. – Т. 46. – № 3. – С. 11-114.
9. Ильичев Н.В. Новый подход к созданию диодных защитных устройств / Н.В. Ильичев, С.В. Николаев, В.В. Шаповалова // *Мат-ли конф., Севастополь, 2005*. – С. 189-190.
10. Ильичев Н.В. Диодные защитные устройства с резонатором на связанных микрополосковых линиях / Н.В. Ильичев, В.Г. Калина, В.В. Шаповалова. – *Электронная техника, сер. СВЧ-техника*, 2005. – Вып. 1(483). – С. 204.
11. Sarkar B.K. Design consideration for high-isolation coaxial broad-band p-i-n diode switches and limiters // *IEEE Trans.*, 1983. – V. MTT-31, № 9. – P. 776-777.

Поступила в редколлегию 1.12.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Купченко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ЗАХИСТУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ  
ВІД ВПЛИВУ ПОТУЖНИХ ЕМІ НА ОСНОВІ  
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ**

І.А. Капура, Г.Ф. Коняхин, А.М. Сотників

*Показано, що перспективним у цей час при проектуванні захисних пристроїв вхідних ланцюгів прийомного СВЧ тракту є використання високотемпературних надпровідників внаслідок їх низького поверхневого опору. Метод захисту РЭА від впливу ЭМИ здійснюється за рахунок різкого збільшення опору ЗУ на кілька порядків при переході захисного пристрою в нормальний фазовий стан, що рівноцінно розриву фідерної лінії передачі.*

**Ключові слова:** високотемпературний надпровідник, мікрополоскова лінія, копланарна лінія, гранична потужність, захисний пристрій.

**DEVELOPMENT OF METHOD OF DEFENCE OF RADIO ELECTRONIC APPARATUS  
FROM INFLUENCE POWERFUL AMY ON THE BASIS  
OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS**

I.A. Kapura, G.F. Konyakhin, A.M. Sotnikov

*Is Rotined that perspective presently at planning of protective devices of entrance chains receiving SVCH highway there is the use of high temperature superconductors because of their low superficial resistance. Method, protecting of REA from influence AMY is carried out due to the sharp increase of resistance ZU on a few orders in transition of protective device in the normal phase state, that equivalently to the break of fidernoy tl.*

**Keywords:** high temperature superconductor, microstrip line, coplanar line, threshold power, protective device.