

Investigation of Powerful Electromagnetic Radiation Influence on Receiving Antenna Systems with Superconducting Protective Devices

Yeromina N.S.¹, Kravchenko I.I.², Kurylov M.N.³, Borysenko V.P.¹, Borysenko T.I.¹, Kyvliuk V.S.⁴, Kryvosheiev V.V.⁴, Pribyliev Y.B.⁴, Gnusov Y.V.⁵, Radchenko V.V.⁵, Kaliakin S.V.⁵

¹ Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

² Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

³ National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

⁴ National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kiev, Ukraine

⁵ Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine

Abstract. This work is devoted to the problem of the effect of a powerful ultra-short duration electromagnetic radiation on the superconducting protection device as a load of antenna-feeder circuit of radioelectronic systems. The above device is used in the monitoring systems of the land surface to the benefit of agriculture, geodesy, mapping, monitoring of land and ocean surfaces, and, also, the atmospheric layers, remote control systems in engineering and industry related branches. This goal was achieved by substantiation of the approach to the description of the arbitrary antenna response to the electromagnetic radiation, using the antenna system frequency response. The most significant result is the offered approach to the relationship determination between the response of the arbitrary antenna to the radiation influence and its characteristics in a radiation mode. The sought relationship determination showed that, such characteristics of the antenna systems are the antenna input impedance and the complex normalized radiation pattern in the radiation mode at an arbitrary frequency. The significance of the results is in obtainment of the analytical relations to estimate the effect of the radiation under consideration on the device that is in superconducting, mixed and normal phase states. The peculiarity of the obtained results makes it possible to consider the antenna system coordination degree of the protection device based on superconducting thin film. Conversion of the radiation energy into the induced currents' energy that is the basis for selection and structural calculation of protection devices of the radio electronic facilities against powerful electromagnetic radiation build upon microstrip transmission lines.

Keywords: radio-electronic means, powerful electromagnetic radiation, protection device, antenna system, superconducting thin film, phase states.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.11>

UDC: 621.396.677

Investigarea influenței radiațiilor electromagnetice puternice asupra sistemelor de antene de recepție cu dispozitive de protecție supraconductoare

Yeromina N.S.¹, Kravchenko I.I.², Kurilov M.N.³, Borysenko V.P.¹, Borysenko T.I.¹, Kuivliuk V.S.⁴, Kryvosheiev V.V.⁴, Pribyliev Y.B.⁴, Gnusov Y.V.⁵, Radchenko V.V.⁵, Kaliakin S.V.⁵

¹ Universitatea Națională de Radio Electronică din Harkiv, Harkiv, Ucraina

² Universitatea Națională a Forțelor Aeriene Ivan Kozhedub Harkiv, Harkiv, Ucraina

³ Academia Națională a Gărzii Naționale a Ucrainei, Harkiv, Ucraina

⁴ Universitatea Națională de Apărare din Ucraina, numită după Ivan Cherniakhovskyi, Kiev, Ucraina

⁵ Universitatea Națională de Afaceri Interne din Harkiv, Harkiv, Ucraina

Rezumat. Scopul acestei lucrări este de a investiga influența radiațiilor electromagnetice puternice de durată foarte scurtă asupra dispozitivului de protecție supraconductor ca sarcină a circuitului antenă-alimentator al sistemelor radioelectronice utilizate în sistemele de monitorizare a suprafeței terestre în interesul agriculturii, geodeziei, cartografierii, monitorizării suprafeței terestre și oceanice, precum și a straturilor atmosferei, sistemelor de control la distanță în inginerie și în ramurile adiacente ale industriei. Scopul declarat este atins prin fundamentarea metodei de descriere a răspunsului unei antene arbitrare la radiația electromagnetică, utilizând răspunsul în frecvență al sistemului de antene. Cel mai semnificativ rezultat este abordarea propusă pentru determinarea relației dintre răspunsul unei antene arbitrare la influența radiației și caracteristicile sale în modul de radiație. Se arată că, în determinarea relației dorite, astfel de caracteristici ale sistemelor de antene sunt impedența de intrare a antenei și diagrama de radiație normalizată complexă în modul de radiație la o frecvență arbitrară. Semnificația rezultatelor obținute constă în obținerea unor relații analitice pentru estimarea influenței radiației în cauză asupra dispozitivului de protecție care se află în stare supraconductoare, mixtă și în fază

normală. Particularitatea rezultatelor obținute constă în posibilitatea de a lua în considerare gradul de coordonare a sistemului de antene cu dispozitivul de protecție bazat pe pelicula subțire supraconductoare și conversia energiei de radiație în energie de curenți induși, care constituie baza pentru selectarea și calculul structural al dispozitivelor de protecție a instalațiilor radioelectronice de influența radiațiilor electromagnetice puternice bazate pe linii de transmisie cu microbandă.

Cuvinte cheie: mijloace radio-electronice, radiații electromagnetice puternice, dispozitiv de protecție, sistem de antenă, peliculă subțire supraconductoare, stări de fază.

Исследование влияния мощных электромагнитных излучений на приемные антенные системы со сверхпроводящими защитными устройствами

Еремина Н.С.¹, Кравченко И.И.², Курилов М.Н.³, Борисенко В.П.¹, Борисенко Т.И.¹, Кивлюк В.С.⁴, Кривошеев В.В.⁴, Прибылев Ю.Б.⁴, Гнусов Ю.В.⁵, Радченко В.В.⁵, Калякин С.В.⁵

¹ Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

² Харьковский национальный университет ВВС имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина

³ Национальная академия Национальной гвардии Украины, Харьков, Украина

⁴ Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

⁵ Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является исследование влияния мощного электромагнитного излучения ультракороткой длительности на сверхпроводящее устройство защиты, как нагрузку антенно-фидерного тракта радиоэлектронных систем, используемых в системах мониторинга земной поверхности в интересах сельского хозяйства, геодезии, картографировании, мониторинге поверхности земли и океана, а также слоев атмосферы, системах дистанционного управления в машиностроении и смежных отраслях промышленности. Поставленная цель достигается путем обоснования подхода к описанию реакции произвольной антенны на воздействие электромагнитного излучения с использованием частотной характеристики антенной системы. Ниболее существенным результатом является предложенный подход к определению связи реакции произвольной антенны на воздействие излучения с ее характеристиками в режиме излучения. Показано, что при определении искомой связи такими характеристиками антенных систем являются входной импеданс антенны и комплексная нормированная диаграмма направленности в режиме излучения на произвольной частоте. Значимость полученных результатов состоит в получении аналитических соотношений для оценки влияния рассматриваемого излучения на защитное устройство, находящееся в сверхпроводящем, смешанном и нормальном фазовых состояниях. Особенность полученных результатов заключается в возможности учёта степени согласования антенной системы с устройством защиты на основе сверхпроводящей тонкой пленки, а также преобразование энергии излучения в энергию наведенных токов, что является основой для выбора и конструктивного расчета устройств защиты радиоэлектронных средств от воздействия мощного электромагнитного излучения на основе микрополосковых линий передачи. Новизна работы заключается в том, что получила дальнейшее развитие теория защиты радиоэлектронных средств, используемых в разных отраслях народного хозяйства и оснащенных антенными системами со сверхпроводящими защитными устройствами в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения, практическое применение которой обеспечит надежности функционирования этих систем.

Keywords: радиоэлектронное средство, мощное электромагнитное излучение, устройство защиты, антенная система, сверхпроводящая тонкая пленка, фазовые состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Применение в ряде отраслей импульсных генераторов мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) с длительностью импульсов порядка 1 нс и менее может оказывать негативное влияние на работу радиоэлектронных средств (РЭС) при попадании в зону их действия. Прежде всего это касается систем мониторинга земной поверхности, используемых в интересах сельского хозяйства, геодезии, картографировании, мониторинге поверхности земли и океана, слоев атмосферы, а также систем дистанционного

управления в машиностроении и смежных отраслях промышленности, в состав которых входят радиоприемные устройства (РПУ) [1]. Для защиты РЭС предлагается применять защитные устройства на основе радиоизотопно-плазменных технологий [2, 3], способные осуществлять защиту от мощного импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) ультракороткой длительности. В тоже время для защиты РЭС, в состав которых входят РПУ, рассматривается целесообразность применения устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [4, 5], конструктивно размещаемых во входных

цепях после антенно-фидерного тракта (АФТ) РПУ. При приеме полезных сигналов через сверхпроводящую пленку протекает транспортный ток, что обеспечивает пребывание таких защитных устройств в сверхпроводящем фазовом состоянии. При этом формирование нормальных областей на краях тонкой пленки не приводит к разрушению сверхпроводимости, поскольку ширина этих областей не превышает величину глубины проникновения λ_1 для данного сверхпроводника [6, 7]. При попадании МЭМИ на вход РПУ через тонкую пленку защитного устройства начинает протекать ток, который будет превышать значение первого критического тока I_{c1} , что приводит к увеличению объема нормальных областей на краях тонкой пленки и разрушению сверхпроводимости (смешанное состояние). Достижение током значения второго критического тока I_{c2} означает переход защитного устройства в несверхпроводящее (нормальное) фазовое состояние [7]. При этом защита РЭС от воздействия МЭМИ будет осуществляться за счет рассогласования линии передачи, когда устройство защиты находится в смешанном и нормальном фазовых состояниях [6]. Исходя из этого, в качестве параметра, характеризующего рассогласование линии передачи такими защитными устройствами, целесообразно использовать их волновое сопротивление в сверхпроводящем, смешанном и нормальном состояниях. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения исследований, направленных на определение влияния МЭМИ на приемные устройства РЭС с произвольной антенной с учетом включения сверхпроводящего защитного устройства.

Анализ литературы.

В работе [4] предложена методика определения параметров микрополосковой линии передачи на основе высокотемпературных сверхпроводящих пленок с учетом поверхностного импеданса. Однако в предложенной методике определение искомых параметров осуществляется без учета воздействия ЭМИ на пленку. В работе [5] рассмотрено влияние переходных процессов в сверхпроводящем защитном устройстве с точки зрения возможности возникновения незатухающих колебаний и их влияния на работу

аппаратуры. Изучена вольт-амперная характеристика защитного устройства, в тоже время авторы не исследовали влияние МЭМИ переходные процессы, оставив без внимания также вопросы нахождения тонкой пленки в разных фазовых состояниях. В работе [6] приведены результаты исследований зависимости длительности S-N фазового перехода от незначительных величин амплитуды напряжения входного сигнала. В тоже время зависимость волнового сопротивления сверхпроводящей пленки в разных фазовых состояниях при воздействии ЭМИ не исследовалась. В работе [7] приведены результаты определения глубины проникновения электромагнитных волн в сверхпроводящую пленку и ее поверхностного импеданса. Авторы приводят зависимость коэффициента качества сверхпроводящей пленки от ее толщины. В тоже время авторы не уделили внимания воздействию именно мощного ЭМИ на изменения фазового состояния пленки и определению величины поверхностного сопротивления в этих условиях. В работе [8] показана возможность управления фильтром на основе микрополосковой линии мощностью до 10 Вт. Воздействия МЭМИ с параметрами более десятков-сотен МВт не рассматривались. При этом микрополосковая линия не исследуется в качестве защитного. В [9] авторами подробно исследуется частотная зависимость величины глубины проникновения магнитного поля в тонкую пленку. При этом авторы не конкретизировали значения амплитуды внешних воздействий, а также не уделили внимания определению поверхностного импеданса тонкой пленки. Кроме того, в работе тонкая пленка не рассматривается в качестве устройства защиты входных цепей приемного устройства. В работе [10] приведены результаты анализа электродинамической модели структуры феррит/сверхпроводник. Исследованы дисперсионные свойства поверхностной магнитостатической волны. Найдено поверхностное сопротивление сверхпроводящей пленки в магнитном поле. В тоже время авторы оставили без внимания влияние мощного ЭМИ на параметры тонкой пленки, как и особенности ее применения в качестве защитного устройства приемного тракта.

В работе [11] приведены результаты исследований, которые привели к синтезу сверхпроводящих материалов с характеристиками, позволяющими расширить область применения этого вида материалов. Приведены примеры применений сверхпроводящих материалов, а также результаты использования сверхпроводящих блоков в интересах метода быстрого ядерного магнитного резонанса с циклическим полем.

В [12] представлен обзор сверхпроводниковой передачи энергии, а также рассмотрены передача переменного и постоянного тока, проводники с теплым и холодным диэлектриком. Отмечены преимущества сверхпроводниковой передачи энергии, такие как увеличенная мощность и эффективность, а также его потенциальное влияние на энергосбережение и окружающую среду. Описано современное состояние развития ВТСП проводников от первого до второго поколения, а также возможная роль диборида магния (MgB_2).

В работе [13] показана перспективность применения сверхпроводников, обусловленная при использовании в сверхпроводящих линиях электропередачи существенным преимуществом в размерах и меньшими суммарными электрическими потерями при передаче больших мощностей. Показаны технологические преимущества по сравнению с решениями на основе стандартных проводников, что приводит к минимальному воздействию на окружающую среду и обеспечивает более устойчивую передачу электроэнергии. Приведены результаты сравнения сверхпроводящих линий электропередачи на основе нового сверхпроводника на основе диборида магния (MgB_2) и высокотемпературных сверхпроводников с современными воздушными линиями постоянного тока высокого напряжения и подземными кабелями на резистивных проводниках.

В [14] приведены результаты разработки технологии изготовления ВТСП-магнита для силового трансформатора. Были исследованы технологии высокого напряжения, технологии с большим током и низкими потерями переменного тока, а также технологии систем переохладения для создания технологии силового трансформатора HTS класса.

В статье [15] приведены результаты исследований сверхпроводящего магнитного

накопителя энергии, показаны потенциальные области его применения.

В работе [16] предложен обзор и проведена сравнительная оценка 19 технологий накопления электроэнергии на основе их технических и эксплуатационных характеристик, и представлены пары технология-приложение, идентифицированные по всей цепи электроснабжения. Показано, что суперконденсаторы и сверхпроводящие магнитные накопители энергии по-прежнему ориентированы на приложения, основанные на мощности.

В статье [17] приведены результаты исследований применения сверхпроводников в мощных импульсных источниках. Показано, что их работа при температурах выше 20К облегчает криогенику, повышает стабильность и улучшает работу импульсных источников питания.

В [18] авторами предложены сведения об основном типе структуры, принципе сверхпроводимости и применении медно-оксидного сверхпроводника, показаны различия между сверхпроводниками на основе оксида меди и обычными сверхпроводниками, а также механизм их сверхпроводимости. Представлены области применения нескольких основных сверхпроводников на основе оксида меди.

В [19] авторами проанализированы сверхпроводник на основе оксида меди и сверхпроводник на основе борида магния. Показано различия между сверхпроводниками на основе оксида меди и обычными сверхпроводниками и их сверхпроводящий механизм.

В [20] проанализированы различные структурные формы оксида меди и подробно описан механизм его сверхпроводимости. Представлены области применения нескольких основных сверхпроводников на основе оксида меди.

Таким образом, анализ известных работ показал, что проводимые исследования как по применению высокотемпературных сверхпроводников в качестве защитных устройств, так и исследованию их параметров при воздействии МЭМИ, проходящего через АФТ, не получили к настоящему времени должного рассмотрения. Ввиду отсутствия известных результатов в этом направлении целесообразно продолжить исследования влияния МЭМИ на нагрузку антенно-

фидерного тракта с учетом нахождения защитного устройства в сверхпроводящем, смешанном и нормальном фазовых состояниях не конкретизируя тип антенной системы.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для описания реакции произвольной антенны на воздействие МЭМИ УКДИ с характеристиками антенной системы использованы методы теории антенно-фидерных систем и метод комплексных амплитуд, что позволило установить связь между входным воздействием МЭМИ и выходной реакцией антенны.

При решении задачи получения аналитических соотношений для оценки влияния МЭМИ на защитное устройство, как нагрузку антенно-фидерного тракта РПУ, находящееся в сверхпроводящем, смешанном и нормальном фазовых состояниях использованы методы теории электрических и радиотехнических цепей, в частности метод комплексных амплитуд и метод эквивалентного генератора.

Обоснование подхода к описанию реакции произвольной антенны на воздействие МЭМИ УКДИ с характеристиками антенной системы

Электродинамические свойства антенно-фидерных трактов существенно влияют на величину энергии ЭМИ, выделяемой на нагрузку. Обычно в качестве нагрузки антенно-фидерных трактов рассматриваются приемные устройства, предназначенные для преобразования энергии поля электромагнитных волн в месте приема с целью извлечения переносимой ими полезной информации. Исходя из этого, для описания электродинамических свойств приема ЭМИ произвольной антенной воспользуемся ее частотной характеристикой. При этом учтем, что ЭМИ, ширина спектра которого соизмерима с его средней частотой, соответствует понятию сверхширокополосного сигнала. Поэтому под частотной характеристикой приемной антенны $\vec{H}(j\omega, \vec{r})$ будем понимать вектор зависимости отношений комплексных амплитуд выходного сигнала антенны к комплексным амплитудам соответствующих поляризационных компонент источника электромагнитного поля от частоты и точки

расположения источника \vec{r} излучения. Таким образом, данная характеристика позволяет установить связь между входным воздействием МЭМИ и выходной реакцией антенны. Такой подход позволяет определить связь реакции произвольной антенны на воздействие с характеристиками этой антенны в режиме излучения МЭМИ УКДИ. Такими характеристиками являются входной импеданс антенны $Z_a(j\omega)$ и комплексная нормированная диаграмма направленности (ДН) в режиме излучения $d(j\omega, \theta, \phi)$ на произвольной частоте [21]:

$$H(j\omega, \theta, \phi) = \frac{c}{\omega\sqrt{30}} \frac{R_n \sqrt{R_a}}{R_n + Z_a(j\omega)} \times F(\omega) d(j\omega, \theta, \phi), \quad (1)$$

где R_n — сопротивление нагрузки, $R_a = \text{Re}\{Z_a(j\omega)\}$, $F(\omega)$ — коэффициент усиления антенны по напряженности поля при воздействии МЭМИ УКДИ.

Параметр $F(\omega)$ связан с коэффициентом усиления антенны по мощности $G(\omega)$ соотношением:

$$F(\omega) = \sqrt{G(\omega)}, \quad (2)$$

$$G(\omega) = \frac{4\pi}{\int_s |d(j\omega, \theta, f)|^2 dS}, \quad (3)$$

где интегрирование производится по поверхности окружающей антенну сферы большого радиуса.

Выражение (1) можно переписать в виде произведения двух сомножителей, один из которых характеризует степень согласования антенны с нагрузкой, а второй — преобразование энергии падающей электромагнитной волны в энергию наведенных токов:

$$H(j\omega, \theta, f) = H_c(j\omega) H_i(j\omega, \theta, f), \quad (4)$$

где

$$H_c(j\omega) = \frac{\sqrt{R_a} R_n}{\sqrt{30} [R_n + Z_a(j\omega)]}; \quad (5)$$

$$H_i(j\omega, \theta, f) = \frac{c}{\omega} F(\omega) d(j\omega, \theta, f). \quad (6)$$

Очевидно, что параметр $H_i(j\omega, \theta, \phi)$ связан с нормированной диаграммой направленности антенны в режиме излучения. Проведенный анализ показал отсутствие исследований, позволяющих определить ДН антенны при излучении МЭМИ, что делает определение частотной характеристики довольно затруднительным. Поэтому в дальнейшем будем считать, что прием МЭМИ происходит с направления максимальной направленности антенны $d(j\omega, \theta_o, f_o) = 1$. Выполнение этого условия позволяет говорить о неискаженном приеме амплитудного спектра МЭМИ, что соответствует максимальному энергетическому воздействию на приемную антенну.

Условие неискаженного приема амплитудного спектра МЭМИ можно записать, учитывая (1):

$$F(\omega) = \frac{\omega}{c}. \quad (7)$$

Таким образом, при выполнении условия (7) частотная характеристика определяется, в основном, степенью согласованности антенны и нагрузки.

Произвольную приемную антенну можно представить эквивалентной схемой, для которой входной величиной является комплексная амплитуда напряженности электрического поля $E(j\omega, \theta_o, f_o)$, падающего на антенну с направления (θ_o, ϕ_o) .

Тогда комплексную амплитуду напряжения эквивалентного генератора можно записать в следующем виде [12]:

$$U_g(j\omega) = j \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{G(\omega)R_a}{30}} d(j\omega, \theta_o, f_o) \times \sqrt{b^2 - 4ac} \times E(j\omega, \theta_o, f_o) \quad (8)$$

Это напряжение вызывает на сопротивлении нагрузки падение напряжения:

$$U(j\omega) = \frac{R_n U_g(j\omega)}{R_n + Z_a(j\omega)}, \quad (9)$$

и ток

$$I(j\omega) = \frac{U_g(j\omega)}{R_n + Z_a(j\omega)}. \quad (10)$$

Комплексную амплитуду напряженности электрического поля, падающего на антенну, можно представить следующим образом [22]:

$$E(j\omega, \theta_o, f_o) = E(j\omega) = E_m \left(\frac{a_2 - a_1}{\omega^2 - j\omega(a_2 + a_1) - a_2 a_1} \right). \quad (11)$$

Тогда произведение комплексной амплитуды напряжения на нагрузке и частотной характеристики антенны, с учетом (8, 9, 10) будет иметь вид:

$$U(j\omega)H(j\omega, \theta_o, f_o) = j \frac{c}{\omega \sqrt{30}} \frac{R_n \sqrt{G(\omega)R_a}}{R_n + Z_a(j\omega)} \times E(j\omega)H_c(j\omega)H_i(j\omega, \theta_o, f_o) \quad (12)$$

Получить выражение для отклика антенны на произвольное воздействие при известном $Z_a(j\omega)$ можно, применив к (12) преобразование Фурье[22]:

$$u_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U(j\omega)H(j\omega, \theta_o, \phi_o) e^{j\omega t} d\omega, \quad (13)$$

или заменяя в выражении (12) $j\omega$ на p и, пользуясь таблицей по Карсону-Хевийсайду [23], получить результат для отклика во временной области.

Количество теплоты, выделяемое на нагрузке в случае воздействия МЭМИ УКДИ, можно получить, зная наводимое МЭМИ напряжение на нагрузке:

$$Q_n = \int_0^{t_i} \frac{u_n(t)^2}{R_n} dt, \quad (14)$$

где t_i — длительность импульса.

Очевидно, что невыполнение условия:

$$Q_n < Q_d, \quad (15)$$

где Q_d — допустимая мощность на нагрузке,

может привести к выходу элементов РПУ из строя и необходимо применение защитного устройства.

Вывод аналитических соотношений для оценки влияния МЭМИ на защитное устройство, находящееся в сверхпроводящем, смешанном и нормальном фазовых состояниях

В случае воздействия МЭМИ на РПУ, оснащенное защитным устройством (ЗУ), высокотемпературная сверхпроводящая тонкая пленка должна максимально ослабить энергию воздействия. Поэтому данное защитное устройство должно быть включено во входных цепях приемной аппаратуры. В этом случае выражение (5) можно переписать в виде:

$$H_c(j\omega) = \frac{\sqrt{R_n} Z_p}{\sqrt{30} [Z_p + Z_a(j\omega)]}, \quad (16)$$

где Z_p — волновое сопротивление защитного устройства.

Очевидно, что при приеме антенной полезного сигнала выполняется условие:

$$H_c(j\omega) = 1, \quad \omega \in \Delta\omega. \quad (17)$$

Поэтому для волнового сопротивления сверхпроводящего ЗУ должно выполняться условие:

$$\sqrt{R_n} Z_p = \sqrt{30} [Z_p + Z_a(j\omega)],$$

или

$$Z_p = R_n = \frac{\sqrt{30} Z_a(j\omega)}{\sqrt{R_n} - \sqrt{30}}. \quad (18)$$

Для воздействия на АФУ МЭМИ, нагрузкой является сверхпроводящее защитное устройство. Тогда с учетом возможности нахождения защитного устройства в сверхпроводящем S, смешанном S-N и нормальном N состояниях [7] выражение (16) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{cases} H_c^S(j\omega) = \frac{\sqrt{R_n} Z_p^S}{\sqrt{30} [Z_p^S + Z_a(j\omega)]}; \\ H_c^{S-N}(j\omega) = \frac{\sqrt{R_n} Z_p^{S-N}(j\omega)}{\sqrt{30} [Z_p^{S-N}(j\omega) + Z_a(j\omega)]}; \\ H_c^N(j\omega) = \frac{\sqrt{R_n} Z_p^N}{\sqrt{30} [Z_p^N + Z_a(j\omega)]}, \end{cases} \quad (19)$$

где $H_c^S(j\omega)$, $H_c^{S-N}(j\omega)$, $H_c^N(j\omega)$ — показатель, характеризующий степень согласования антенны с защитным устройством, находящимся в сверхпроводящем, смешанном и нормальном состоянии соответственно.

Очевидно, что и комплексную амплитуду напряжения на нагрузке и временной отклик антенны на воздействие МЭМИ можно определить как [7]:

$$\begin{cases} U_S(j\omega) = \frac{Z_p^S(j\omega) U_g(j\omega)}{Z_p^S(j\omega) + Z_a(j\omega)}; \\ U_{S-N}(j\omega) = \frac{Z_p^{S-N}(j\omega) U_g(j\omega)}{Z_p^{S-N}(j\omega) + Z_a(j\omega)}; \\ U_N(j\omega) = \frac{Z_p^N(j\omega) U_g(j\omega)}{Z_p^N(j\omega) + Z_a(j\omega)}, \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} u_n^S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_S(j\omega) H_i(j\omega, \theta_o, \phi_o) \times \\ \times H_c^S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega; \\ u_n^{S-N}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_{S-N}(j\omega) H_i(j\omega, \theta_o, \phi_o) \times \\ \times H_c^{S-N}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega; \\ u_n^N(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_N(j\omega) H_i(j\omega, \theta_o, \phi_o) \times \\ \times H_c^N(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \end{cases} \quad (21)$$

Таким образом, степень энергетического воздействия МЭМИ на нагрузку также необходимо рассматривать с учетом нахождения защитного устройства в сверхпроводящем, смешанном и нормальном фазовых состояниях:

$$\begin{cases} Q_n^S = \int_0^{t_{e1}} \frac{u_n^S(t)^2}{R_n} dt; \\ Q_n^{S-N} = \int_{t_{e1}}^{t_{e2}} \frac{u_n^{S-N}(t)^2}{R_n} dt; \\ Q_n^N = \int_{t_{e2}}^{t_i} \frac{u_n^N(t)^2}{R_n} dt. \end{cases} \quad (22)$$

Приведенная выше методика позволяет определить влияние МЭМИ на приемные устройства с любой произвольной антенной с учетом включения сверхпроводящего защитного устройства.

Основным параметром, характеризующем рассогласование линии передачи защитными устройствами, является их волновое сопротивление в сверхпроводящем, смешанном и нормальном состояниях. Поэтому проведем исследования влияния сверхпроводящих защитных устройств на прохождение сигналов с учетом электродинамических свойств антенно-фидерного тракта при воздействии МЭМИ УКД.

Сверхпроводящее защитное устройство на основе микрополосковой линии передачи

Сверхпроводящее защитное устройство на основе микрополосковой линии передачи (МПЛ) размещается во входных цепях антенно-фидерных трактов. В этом случае защитное устройство имеет вид, представленный на рис. 1. Высокотемпературный сверхпроводник 1 ленточного типа прямоугольного сечения (тонкая пленка), расположен на подложке 2 с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ_{r2} , на обратной стороне которой расположен металлический экран 3.

В МПЛ основной волной является квази Т-волна, которая на частотах менее 1 ГГц по своим свойствам и структуре практически не отличается от Т-волны (векторы E и H лежат в плоскости сечения МПЛ). Структура электромагнитного поля Т-волны, характеризующая распределение напряженности электрического поля и плотности тока, показана на рис.2.

Одним из важных параметров МПЛ является волновое сопротивление. Это объясняется тем, что согласование волнового сопротивления МПЛ с волновым сопротивлением фидерного тракта приводит к беспрепятственному проходу полезного сигнала, и рассогласование его может вызвать отражение и искажение полезного сигнала.

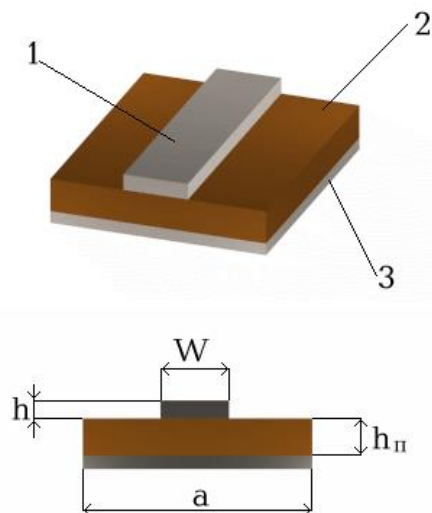


Рис. 1. Сверхпроводящее защитное устройство на основе МПЛ и его основные конструктивные параметры.

Fig. 1. Superconducting protective device based on MSL and its main design parameters.

Волновое сопротивление МПЛ зависит от конструктивных и электрических параметров сверхпроводника и подложки и поэтому является сложной их функцией. Под конструктивными параметрами защитного устройства, построенного на основе микрополосковой линии передачи, будем понимать (рис.1) ширину W и толщину h_n сверхпроводящей полоски, а также толщину h и ширину a диэлектрической подложки.

Однако для определения конструктивных параметров ЗУ на основе МПЛ можно использовать выражение, характеризующее волновое сопротивление защитного устройства при протекании через него транспортного тока.

Для этого случая волновое сопротивление сверхпроводящего защитного устройства построенного на основе МПЛ в предположении, что $\frac{h}{h_n} = 0$, $a \rightarrow \infty$, диэлектрическая проницаемость тонкой пленки в сверхпроводящем состоянии $\epsilon_{r1}=1$, можно вычислить по формулам:

$$Z_{zy} = \frac{k}{\pi} \sqrt{2(\epsilon_{r2} + 1)} \times \left(\ln \frac{8h_n}{W} + \frac{W^2}{32h_n^2} - \frac{(\epsilon_{r2} - 1)}{2(\epsilon_{r2} + 1)} \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \ln \frac{4}{\pi} \right) \right) \quad (23)$$

при $\frac{W}{h_n} < 1$;

$$Z_{k-} = \frac{k}{2} \sqrt{\epsilon_{r2}} \left(\frac{W}{2h_n} + 0,441 + \frac{0,082(\epsilon_{r2} - 1)}{\epsilon_{r2}^2} + \frac{A_1(\epsilon_{r2} + 1)}{2\pi\epsilon_{r2}} \right)^{-1}, \quad (24)$$

при $\frac{W}{h_n} > 1$,

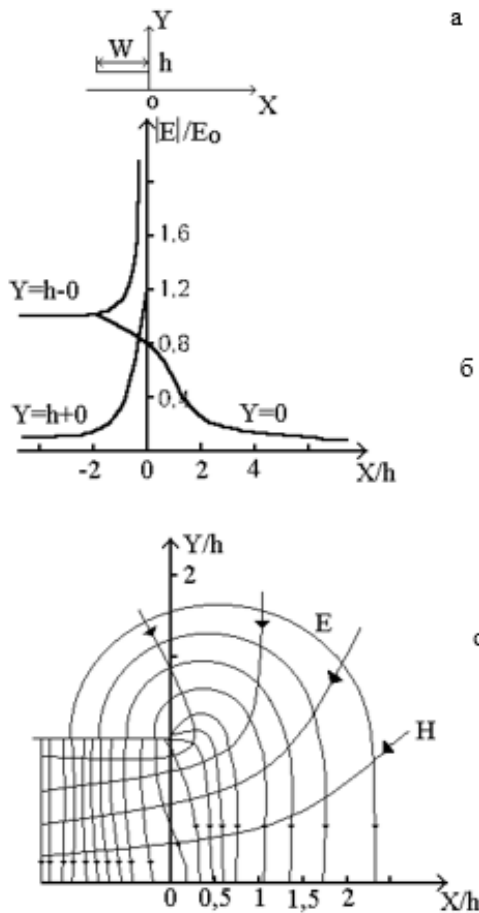


Рис. 2. Структура электромагнитного поля в сверхпроводящем в защитном устройстве на основе МПЛ:

а — система координат; б — изменение напряженности электрического поля; с — структура электрического и магнитного полей.

Fig. 2. The structure of the electromagnetic field in the superconducting protective device based on the MSL:

а — coordinate system; б — change in electric field strength; с — structure of electric and magnetic fields.

где $k = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, $A = 1,451 + \ln\left(\frac{W}{h} + 0,94\right)$.

Однако для согласования ЗУ с фидерным трактом необходимо, чтобы волновое сопротивление защитного устройства было равно волновому сопротивлению линии $Z_{л}$, значение которого известно. Следовательно, необходимо выполнить обратную задачу — найти по заданному Z_{zy} конструктивные размеры. Кроме того, для достижения наибольшего ослабления мощности ЭМИ, необходимо иметь возможно большую протяженность тонкой ВТСП пленки, что на ограниченной площади подложки можно достигнуть лишь уложив сверхпроводник меандром или спиралью с расстоянием между полосками s^* . Выбирая $Z_{zy} = 50$ Ом для подложки с известной ϵ_{r2} , получаем

параметр $\frac{W}{h_n}$:

$$\frac{W}{h} = \frac{8}{(e^d - e^{-d})}, \quad (24)$$

при $d > 2,1$,

$$\frac{W}{h_n} = \frac{2(d_1 - 1)}{\pi} - \frac{2}{\pi} \ln(2d_1 - 1) + \frac{\epsilon_{r2} - 1}{\pi\epsilon_{r2}} \left(\ln(2d_1 - 1) + 0,293 - \frac{0,517}{\epsilon_{r2}} \right), \quad (25)$$

при $d_1 < 2,1$,

где

$$d = 2Z_{л} \frac{\pi}{k} \sqrt{\epsilon_{r2} + 1} + \frac{\epsilon_{r2} - 1}{\epsilon_{r2} + 1} \left(0,226 + \frac{0,12}{\epsilon_{r2}} \right),$$

$$d_1 = \frac{60\pi^2}{Z_B \sqrt{\epsilon_{r2}}}.$$

На основании выражений (24) и (25), были построены зависимости волнового сопротивления МПЛ бесконечно малой толщины от отношения $\frac{W}{h_n}$ при различных значениях ϵ_{r2} , которые представлены на значения для параметра $\frac{W}{h_n}$ представлены в таблице 1, где даны и соответствующие взятым параметрам W , S^* , h_n . Погрешность вычислений по формулам (24), (25) не превышает 1% и 2% соответственно.

Очевидно, что большое различие в значениях параметра $\frac{W}{h_n}$ обусловлено его экспоненциальной зависимостью от

показателя преломления диэлектрика. Если в первом случае желательное увеличение толщины подложки h_n заставило бы еще больше увеличивать ширину сверхпроводника, то во втором случае желательное уменьшение h_n заставило бы уменьшить ширину сверхпроводника, которое итак близко к минимальному пределу этой величины. Кроме того с конструктивным параметром $\frac{W}{h_n}$ связана емкость между сверхпроводящей полоской и металлическим экраном C_2 (рис. 4).

Таблица 1/Table 1.

Расчетные значения параметра W/h_n

Материал подложки	ϵ_{r2}	$tg\delta$	W/h_n	W , мкм	S^* , мкм	h_n , мкм
LaAlO ₃	24,3	-	$3.36 \cdot 10^{-1}$	50	450	150
SrTiO ₃	233	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$7,84 \cdot 10^{-4}$	2	7650	2550

Кроме того с конструктивным параметром $\frac{W}{h_n}$ связана емкость между сверхпроводящей полоской и металлическим экраном C_2 (рис. 3).

Величина этой емкости может быть оценена с помощью эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_{r2} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{r2} - 1}{2\sqrt{1 + \frac{10h_n D}{W}}} \quad (26)$$

Тогда для одного отрезка меандра (рис.4) можно записать:

$$C_2 = \epsilon_{eff} C^* \quad (27)$$

где C^* — емкость линии при отсутствии диэлектрической подложки, величина которой может быть рассчитана с использованием выражения:

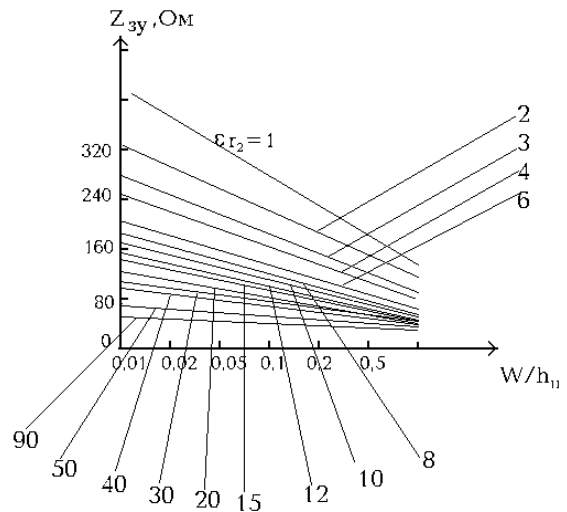


Рис. 3. Соотношение волнового сопротивления сверхпроводящего защитного устройства на основе МПЛ от параметра W/h_n для различных значений ϵ_{r2} .

Fig. 3. The ratio of the wave resistance of a superconducting protective device based on the MSL on the parameter W/h_p for various values of ϵ_{r2} .

$$C^* = 2\varepsilon_0 l \left[\frac{1}{\pi} \left(\ln \pi \frac{W}{2h_D} + 1 \right) + \frac{W}{2h_D} \right] =$$

$$= C_{кр} + \varepsilon_0 \frac{Wl}{h} \quad (28)$$

где $\varepsilon_0 \frac{Wl}{h}$ — емкость плоского конденсатора образованного плоскостью сверхпроводящей пластины и экраном без учета краевых эффектов;

$C_{кр} = 2\varepsilon_0 l \frac{1}{\pi} \left(\ln \pi \frac{W}{2h_D} + 1 \right)$ — краевая емкость, образующаяся за счет проникновения полей за края плоского конденсатора.

Учитывая, что при прохождении сигнала, параметры которого не превышают критические для данного сверхпроводника, емкость C_1 шунтирована нулевым сопротивлением сверхпроводящей полоски, запишем временную форму тока, протекающего через нагрузку:

$$i(t) = U_m \left[\begin{matrix} e^{-a_1 t} \left(\frac{1}{R_H} - C_2 a_1 \right) + \\ + e^{-a_2 t} \left(C_2 a_2 - \frac{1}{R_H} \right) \end{matrix} \right] \quad (29)$$

Таким образом, искажения входного полезного сигнала в основном определяются величиной C_2 (рис. 5). Поэтому при расчете конструктивных параметров защитного устройства необходимо иметь значение C_2

как можно меньше, что для ограниченных геометрических значений подложки снижает рабочий диапазон частот МПЛ — защитного устройства до 100 МГц.

Межвитковая емкость C_1 оказывает влияние на работу МПЛ-защитного устройства в момент фазового S-N перехода и нормального состояния тонкой сверхпроводящей пленки (рис.6).

В смешанном состоянии нелинейное изменение C_1 для одного витка меандра, при условии $l_{omp} \gg S^*$ и $l_{omp} \gg W$ можно записать:

$$C_1(t) = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \varepsilon_{rN} S_{np}}{2S_{rN} + \lambda_n(t) \varepsilon_{r2}} \quad (30)$$

где ε_{rN} — диэлектрическая проницаемость ВТСП в несверхпроводящем состоянии; S_{np} — площадь поперечного сечения витка меандра.

Частотная зависимость емкостного сопротивления, определяемого наличием межвитковой емкости МПЛ-защитного устройства, находящегося в смешанном состоянии, для разных значений S^* , представлена на рис. 7.

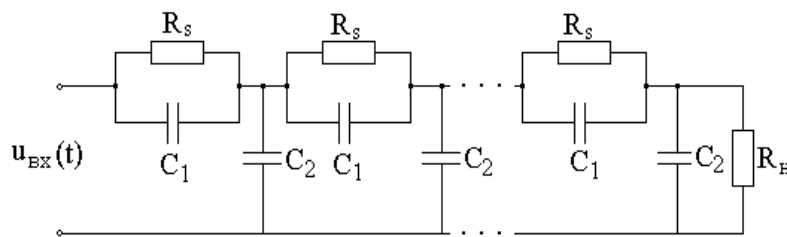


Рис. 4. Эквивалентная схема защитного устройства на основе микрополосковой линии передачи.

$R_{зy}$ — активное сопротивление сверхпроводящей полоски; R_H — сопротивление нагрузки; C_1 — емкость между витками меандра; C_2 — емкость между сверхпроводником и экраном.

Fig. 4. Equivalent circuit of a protective device based on a microstrip transmission line.
 R_{zu} — active resistance of the superconducting strip; R_n — load resistance; C_1 — capacitance between meander turns; C_2 is the capacitance between the superconductor and the screen.

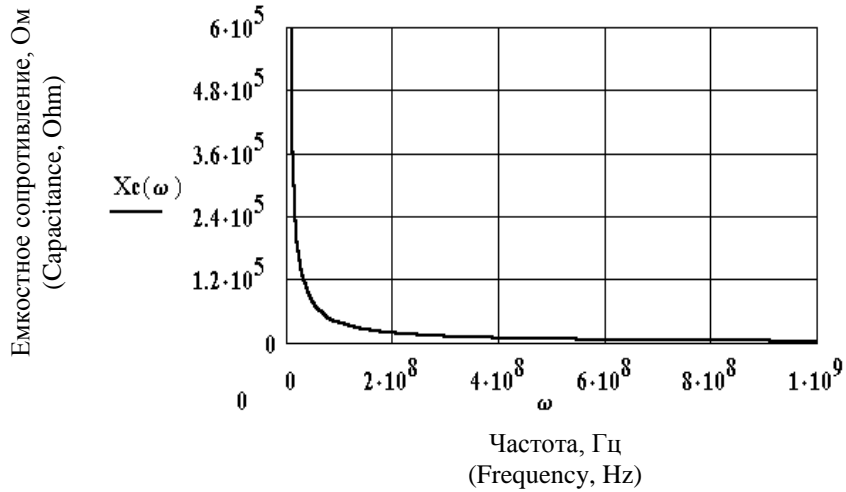


Рис. 5. Изменение сопротивления емкости C_2 от частоты входного сигнала.
 Fig. 5. Change in the resistance of the capacitance C_2 from the frequency of the input signal.

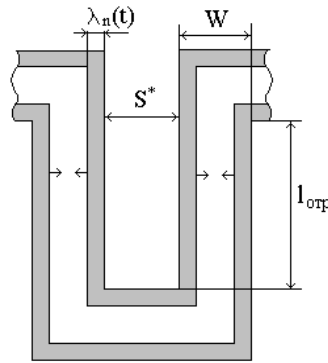


Рис. 6. Межвитковая емкость сверхпроводящего микрополоскового защитного устройства.
 Fig. 6. Interturn capacitance of a superconducting microstrip protective device.

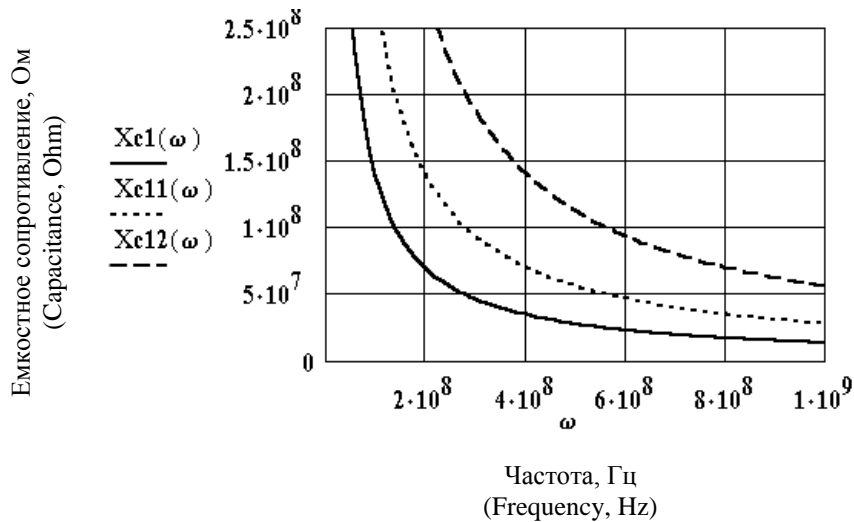


Рис.7. Зависимость сопротивления межвитковой емкости от частоты сигнала в момент фазового S-N перехода.
 Fig.7. Dependence of the resistance of the interturn capacitance on the frequency of the signal at the moment of the phase S-N transition.

($X_{c1}(\omega)$ для $S^* = 50 \cdot 10^{-6}$ м; $X_{c11}(\omega)$
 для $S^* = 100 \cdot 10^{-6}$ м; $X_{c12}(\omega)$ для
 $S^* = 200 \cdot 10^{-6}$ м.)

Таким образом, для сверхпроводящего защитного устройства, находящегося в смешанном состоянии, тонкая пленка которого уложена на подложке $X_{c1} \gg R_{S-N}$ меандром с расстоянием между витками $S^* \geq 50 \cdot 10^{-6}$ м, выполняется неравенство:

$$X_{c1} \gg R_{S-N}.$$

Достаточно малое значение величины $C_1 \approx 10^{-17} - 10^{-18}$ в момент фазового S-N перехода (определяемое выбранными конструктивными параметрами МПЛ-защитного устройства) позволяет не учитывать ее в дальнейшем.

Для нормального состояния C_1 имеет значение близкое к нулю. Это объясняется тем, что в N- состоянии ВТСП представляет собой диэлектрик с диэлектрической проницаемостью $C_1 \approx 10^{-17} - 10^{-18}$.

Таким образом, сверхпроводящее защитное устройство, построенное на основе МПЛ, обладает высоким значением сопротивления в смешанном и несверхпроводящем состояниях (более 10^5 Ом) и малыми габаритными размерами. Однако наличие емкости между сверхпроводящей полоской и экраном ограничивает частотный диапазон использования МПЛ-защитного устройства. Повышение частотного диапазона данного защитного устройства возможно при увеличении расстояния между витками, что технологически затруднительно при ограниченных размерах подложки.

В результате проведенных исследований разработана обобщенная методика определения влияния МЭМИ на устройство защиты, являющееся нагрузкой антенно-фидерного тракта РПУ, с учетом его нахождения в сверхпроводящем, смешанном и нормальном фазовых состояниях. При разработке методики не учитывалось ослабление излучения на трассе его распространения. Ослабление может быть легко учтено введением соответствующего коэффициента, характеризующего степень ослабления излучения на трассе распространения. Полученные в ходе

исследований соотношения позволяют определять конструктивные требования к устройствам защиты на основе как микрополосковых линий передачи. В тоже время для антенн, имеющих сравнительно простую конструкцию (дипольные и рамочные антенны), можно применить более простую методику для определения влияния МЭМИ на РПУ, базирующуюся на представлении антенн квазистатическими эквивалентными схемами Тевенина. Это объясняется тем, что избирательные свойства антенн по отношению к совместно существующим в природе компонентам электромагнитного поля позволяют рассматривать влияние отдельно электрической и магнитной составляющей полей ЭМИ на антенно-фидерный тракт. С другой стороны, такой подход вполне оправдан ввиду того, что падающая плоская электромагнитная волна искажается окружающими металлическими конструкциями, что приводит к доминированию лишь одной из составляющих поля: электрической или магнитной.

Дальнейшие исследования применения сверхпроводящих пленок по мнению авторов должны быть направлены на решение следующих задач:

1. Определение значений волновых сопротивлений защитных устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников в S, N и S-N состояниях.
2. Определение конструктивных параметров защитных устройств на основе компланарных линий.

ВЫВОДЫ

1. Обоснован подход к описанию реакции произвольной антенны РЭС на воздействие МЭМИ УКДИ на основе использования частотной характеристики антенной системы. Это позволило определить связь реакции произвольной антенны на воздействие МЭМИ УКДИ с характеристиками этой антенны в режиме излучения. Показано, что такими характеристиками являются входной импеданс антенны $Z_a(j\omega)$ и комплексная нормированная диаграмма направленности в режиме излучения $d(j\omega, \theta, \phi)$ на произвольной частоте.

2. Получены аналитические соотношения для оценки влияния МЭМИ на защитное

устройство, находящееся в сверхпроводящем, смешанном и нормальном фазовых состояниях. Эти соотношения являются основой для выбора и конструктивного расчета устройств защиты РЭС от воздействия МЭМИ на основе микрополосковых линий передачи.

Литература (References)

- [1] Kobernichenko V.G. Radio-electronic systems for remote sensing of the Earth: study guide / VG Kobernichenko; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Ural Federal University. - Yekaterinburg: Ural University Press, 2016. - 220 p. - ISBN 978-5-7996-1685-4. http://elar.ufu.ru/bitstream/10995/40664/1/978-5-7996-1685-4_2016.pdf (accessed 21.08.2022)
- [2] Sotnikov O., Iasechko M., Larin V., Ochurenko O. and Maksyuta D. The model of a medium for creation of electric hermetic screens of the radio electronic means, IJATCSE. 8(2), 2019, pp. 300-304. doi:10.30534/IJATCSE/2019/32822019. <https://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter027102019.pdf> (accessed 21.08.2022)
- [3] Vorobiov O., Savchenko V., Sotnikov A., Tarshin V. and Kurtseitov T. Development of radioisotopic-plasmathechnology for the protection of radio electronic means from powerful electromagnetic radiation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(85), 2017, pp. 16-22. doi:10.15587/1729-4061.2017.91642. https://www.researchgate.net/publication/316553836_Development_of_radioisotopic_plasma_technology_for_the_protection_of_radio_electric_means_from_powerful_electromagnetic_radiation
- [4] Sotnikov A.M., Kapura I.A., Koniakhin H. F. Metodika opredeleniia parametrov vysokotemperaturnykh sverkhprovodiashchikh SVCh lining peredach s uchetom poverkhnostnogo impedansa [Method for Determining the Parameters of High-Temperature Superconducting super high frequency Transmission Lines with regards to Surface Impedance] - Systemy upravlinnia, navigatsii ta zvyazku. - Kyiv: DP "TNDI NU". - 2010 - Vol. SUNZ-3(15). - 91-93 p. http://library.uipa.edu.ua/images/bibl_prod_bibl/6_statti_fah.doc (accessed 21.08.2022)
- [5] Sotnikov A.M., Kapura I.A., Koniakhin H. F. Resultaty chislennykh raschetov modeli zashchitnogo ustroistva na osnove vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov [Results of numerical calculations of the model of the protective device on the basis of high-temperature superconductors]. Systemy upravlinnia, navigatsii ta zvyazku. - Kyiv:: DP "TNDI NU". - 2010 - Vol. SUNZ-4(16). - 107-111 p. http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2010_9_14
- [6] Chernykh I., Alekseienco O., Mykus S., Peredrii O., Voloshchenko O., Kosenko V. The Methodology for Determining the Status of Normal Domains in Superconducting thin Film From Input Signal, International Journal of Emerging Trends in Engineering Research Volume 8. No. 10, October 2020, <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/1448102020>. <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter1448102020.pdf> (accessed 21.08.2022)
- [7] Yeromina N., Kravchenko I., Kobzev I., Volk M., Borysenko V., Lukyanova V., Gnusov Y., Horelov Y., Rikunov O., Kaplun S. The Definition of the Parameters of Superconducting Film for Production of Protection Equipment Against Electromagnetic Environmental Effects IJETAE, 11(7), 2021, pp. 38-47. DOI: 10.46338/ijetae0721_06. https://ijetae.com/files/Volume11Issue7/IJETAE_0721_06.pdf (accessed 21.08.2022)
- [8] Vendik B., Kondratiev V.V., Kholodniak D.V., Galtchenko S.A., Deleniv A.N., Goubina M.N., Svishchev A.A, Leppavuori S., Hagberg J., Jakku E. High-temperature superconductor filters: modelling and experimental investigations. // IEEE Trans. Appl. Supercond.-1999, v. 9, p.3577-3580. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/783803> (accessed 21.08.2022)
- [9] Contreras A, Ribo Metal (2018) Compact fully uni-planar band stop filter based on slow-wave multimodal CPW resonators. IEEE Microw Wirel Compon Lett 28(9):780-782. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8421621>(accessed 21.08.2022)
- [10] Elsheikh MAG, Safwat AME (2019) Wide band modeling of SRR-loaded coplanar waveguide. IEEE Trans Microw Theory Tech 67(3):851-860. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8746623> (accessed 21.08.2022)
- [11] Nishijima S. and al.: "Superconductivity and the environment: a Roadmap", Supercond. Sci. Technol. 26, 113001 (35pp), 2013. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/26/11/113001/meta> (accessed 21.08.2022)
- [12] Jones H.: "Superconductors in the transmission of electricity and networks", Elsevier, Energy Policy 36 4342-4345, 2008. acceptance??. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421508004473> (accessed 21.08.2022)
- [13] Thomas H. and al.: "Superconducting transmission lines - Sustainable electric energy transfer with higher public Elsevier, 2016. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S136403211501120X?token=921E8AB4CCDD1EAE69BEC2D76C8F7BA9300FA9E701C49F5FF68CEFC9733CC400B0F7D6B70902157ACEF11E2352DE0ED&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220728075218> (accessed 21.08.2022)
- [14] Bohno T. and al.: "Development of 66kV/6.9kV 2MVA prototype HTS power transformer", Physica C: Superconductivity, 426-431, Part 2, pp.

- 1402-1407, 2005.
https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=R N:37112137 (accessed 21.08.2022)
- [15] Ali M. and al: "An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 1, No. 1, 2010.
https://www.researchgate.net/publication/224125235_An_Overview_of_SMES_Applications_in_Power_and_Energy_Systems (accessed 21.08.2022)
- [16] Ibrahim H., Ilinca A., Perron J.: "Energy storage systems Characteristics and comparisons", Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 1221-1250, 2008.
[https://www.scrip.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2531543](https://www.scrip.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2531543) (accessed 21.08.2022)
- [17] Tixador P. and al.: "Design and First Tests of a 800kJ HTS SMES, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 17. No. 2, 2007.
https://www.researchgate.net/publication/224311663_First_tests_of_a_800_kJ HTS SMES (accessed 21.08.2022)
- [18] Zhang C, Wang F, Li K, Liu K. New Development of practical High temperature Superconducting Materials. Hot Working Technology. 2017;46(14):7-10.
https://www.researchgate.net/publication/329974226_Progress_in_the_research_of_copper-oxide_superconductors (accessed 21.08.2022)
- [19] Wen HH. Progress in the study of New High temperature Superconducting Materials. Journal of Materials Research. 2015; 29(10):241-254.
<https://www.cjmr.org/EN/10.11901/1005.3093.2015.111> (accessed 21.08.2022)
- [20] Jia C, Zhang JD, Jin Q. Progress in preparation of High temperature Copper oxide superconductors. Journal of Intraocular Lens. 2014;43(8):2113-2117.
https://www.researchgate.net/publication/329974226_Progress_in_the_research_of_copper-oxide_superconductors (accessed 21.08.2022)
- [21] Shostak A. S. Antennas and microwave devices. / A. S. Shostak. - Tomsk, 2012. p. 278. (In Russian) https://www.studmed.ru/shostak-a-s-antenny-i-ustroystva-svch-chast-1-ustroystva-svch_697410bb14a.html
- [22] Fundamentals of electrical engineering and electronics: a textbook for higher professional education / V. T. Eremenko, A. A. Worker, A. P. Fisun, etc.; under the general ed. of V. T. Eremenko. - Orel: FSBEI HPE "Gosuniversitet-UNPK", 2012-529 p.
https://ethw.org/Category:Engineering_fundamentals?gclid=EAIaIQobChMI0YyZhJCb-QIVGtnVCh3dRgXkEAAAYASAAEgKnyfD_BwE (accessed 21.08.2022)
- [23] Operational calculus: a textbook / M. A. Pleskunov. - Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta, 2014-143 p. (In Russian).
https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/28997/1/978-5-7996-1161-3_2014.pdf (accessed 21.08.2022)

Сведения об авторах / Information about authors.



Еремина Наталья Сергеевна, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область интересов: навигация летательных аппаратов, компьютерные системы и технологии, АСУ, методы и способы защиты от ЭМИ.
 E-mail: ereminaport@gmail.com



Кравченко Иван Иванович, преподаватель кафедры, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Область интересов: генерирование ЭМИ, влияние мощного излучения на АСУ и электронные приборы, устройства защиты от ЭМИ.
 E-mail: kravchenkoivan@ukr.net



Курилов Максим Николаевич, Национальная академия Национальной гвардии Украины. Область интересов: устройства защиты от ЭМИ, АСУ, инженерные технологии.
 E-mail: kurilovmaksim8@gmail.com



Борисенко Виктор Петрович, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область интересов: влияние мощных ЭМИ на АСУ, устройства защиты от ЭМИ, компьютерные технологии.
 E-mail: viktor.borysenko@nure.ua



Борисенко Татьяна Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.
Область интересов: влияние мощных ЭМИ, защитные устройства от ЭМИ, методы и средства защиты вычислительной техники.
E-mail: tatiana.borysenko@nure.ua



Кивлюк Владимир Семенович, кандидат экономических наук, доцент кафедры, Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского.
Область интересов: экономические аспекты разработки и применения средств и методов защиты в промышленности, устройства защиты.
E-mail: vsk.kvs47@gmail.com



Кривошеев Виталий Валерьевич, кандидат военных наук, доцент кафедры, Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского.
Область интересов: защита радиоэлектронных средств от мощных энергетических помех.
E-mail: kr_vilya@ukr.net



Прибылев Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры, Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского.
Область интересов: инженерные технологии, электронные приборы и системы управления, средства и методы защиты устройств.
E-mail: pribilev@meta.ua



Гнусов Юрий Валерьевич, кандидат технических наук, заведующий кафедры, Харьковский национальный университет внутренних дел.
Область интересов: кибербезопасность, искусственный интеллект, математическое прогнозирование.
E-mail: gyvduke@gmail.com



Радченко Валерий Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры, Харьковский национальный университет внутренних дел.
Область интересов: моделирование радиотехнических систем на основе законов электродинамики.
E-mail: valeryradchenko2007@gmail.com



Калякин Сергей Владимирович, преподаватель кафедры, Харьковский национальный университет внутренних дел.
Область интересов: кибербезопасность, искусственный интеллект.
E-mail: svk221075@gmail.com