

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА

к.т.н. Д.Б. Кучер
(представил д.т.н. И. И. Зима)

Рассматриваются основные свойства сверхпроводящего устройства защиты радиоэлектронной аппаратуры от мощных электромагнитных излучений малой длительности.

В настоящее время для ограничения значительных по амплитуде токов и напряжений, возникающих под действием мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) в линиях связи радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), применяют различного типа защитные устройства. К ним относятся газоразрядные приборы, варисторы, стабилитроны и ограничительные диоды.

Правильность выбора защитного устройства определяется основными требованиями, предъявляемыми к эффективности их функционирования [1,2]:

- технические характеристики и параметры защитных устройств при отсутствии МЭМИ не должны влиять на функциональные характеристики устройств, в которых они используются;

- уровень напряжения и тока во время действия мощных электромагнитных излучений в точках подключения защитного устройства должен быть максимально близким к нормальному уровню напряжения и тока, действующему до перегрузки;

- быстродействие защитного устройства должно быть максимально возможным, чтобы обеспечить качественную защиту при больших скоростях изменения напряжения и тока в цепи, вызванных МЭМИ.

Анализ существующих защитных устройств [1], показал, что они не способны защитить РЭА от проникновения МЭМИ через антенно - фидерные устройства, в случае если длительность мощных электромагнитных излучений меньше единиц наносекунд. Это обусловлено сравнительно медленными физическими процессами, определяющими время переключения данных защитных устройств.

© к.т.н. Д.Б. Кучер, 1998

В последнее время появилось достаточно много публикаций посвященных техническому применению фазового перехода высокотемпературного сверхпроводника из сверхпроводящего (**S**) в нормальное (**N**) состояние [1]. По различным литературным источникам длительность этого перехода оценивается в $10^{-12} - 10^{-14}$ с [3]. Поэтому защитное устройство, принцип действия которого основан на физическом процессе фазового **S** - **N** перехода, обеспечило бы надежную защиту РЭА в УКВ и СВЧ диапазонах.

Конструктивно сверхпроводящее защитное устройство представляет собой проводник ленточного типа и прямоугольного сечения, выполненный из высокотемпературного сверхпроводника и расположенный на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью [1]. При приеме полезных сигналов сверхпроводящая полоска находится в **S** состоянии.

В случае прихода МЭМИ ток, протекающий в линии, разрушает сверхпроводимость ленточного проводника и переводит его в **N** состояние, тем самым увеличивая его волновое сопротивление на несколько порядков, благодаря чему исключается возможность проникновения МЭМИ во входные цепи радиоэлектронной аппаратуры.

Соотношением фазовой скорости распространения электромагнитной волны вдоль сверхпроводящей полоски в момент фазового **S** - **N** перехода и скорости движения зон нормальной проводимости (**N** - зон), образующихся за счет превышения плотности тока на краях полоски критического значения плотности тока аннигиляции сверхпроводящих электронов, характеризуется инерционность защитного устройства [1]. Если величина $v_{\phi}(t)$ превышает скорость движения **N** - зон, то фазовый **S** - **N** переход происходит с запаздыванием, в результате чего возникает возможность проникновения опасного сигнала через защитное устройство.

Исследуем распространение электромагнитного сигнала по сверхпроводящей полоске в момент фазового **S** - **N** перехода ($t_{c1} \leq t < t_{c2}$).

В момент времени t_{c1} , когда ток, протекающий через сверхпроводящую полоску, достигает значения I_{c1} , электромагнитная волна проникает в сверхпроводник на глубину λ_1 . Магнитное поле, огибающее сверхпроводящую полоску (вектор **H** направлен перпендикулярно направлению распространения тока), вызывает аннигиляцию сверхпроводящих электронов на краях полоски в слое шириной $\lambda_n(t) = \lambda_1$. С увеличением тока величина $\lambda_n(t)$ растёт, пока в момент времени t_{c2} ток не достигнет значения I_{c2} , для которого

$$\lambda_n(t_{c2}) = W/2, \quad (1)$$

где W - ширина сверхпроводящей полоски.

Для этого случая абсолютная диэлектрическая $\epsilon_a(t)$ и абсолютная магнитная $\mu_a(t)$ проницаемости будут равны

$$\begin{aligned}\epsilon_a(t) &= \epsilon_0 \left(\frac{i(t)}{I_{cl}} \right); \\ \mu_a(t) &= \left(\frac{I_{cl}}{i(t)} \right),\end{aligned}\tag{2}$$

где ϵ_0, μ_0 - электрическая и магнитная постоянные.

Выбирая для электромагнитного воздействия имеющего вид

$$u(t) = U_m (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t})$$

параметр $\omega = \pi/t_n$, запишем коэффициенты затухания $\alpha(t)$ и фазы $\beta(t)$:

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{t_n} \sqrt{\frac{\mu_0 t_n I_{c2} l}{2\pi S U_m (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t})}},\tag{3}$$

$$\beta(t) = \frac{\pi}{t_n} = \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0}{2}} \sqrt{2 + \frac{t_n I_{c1} l}{(\pi \epsilon_0 S U_m (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}))^2}},\tag{4}$$

где S - площадь сечения сверхпроводящей полоски.

Тогда скорость распространения волны

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0}{2}} \sqrt{2 + \frac{t_n I_{c1} l}{(\pi \epsilon_0 S U_m (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}))^2}}},\tag{5}$$

На основании работ [1, 4] выражение (5) можно сравнить с выражением для скорости движения \mathbf{N} - зоны и учитывая, что

$$\mu_0^2 \varepsilon_0^2 / 2 \ll, \frac{(\mu_0 t_n I_{c2} l)^2}{\left(2\pi S U_m (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t})\right)^2},$$

получим

$$v_n(t) = v_\phi(t)^3 \left(\frac{\lambda_1^2 \sqrt{\mu_0^3 t_n^3 I_{c1}}}{3 h t_\Delta \sqrt{2\pi^3 \rho_n^3 I_{c2}}} \right), \quad (6)$$

где ρ_n - удельное сопротивление сверхпроводника в \mathbf{N} состоянии; t_Δ - время аннигиляции сверхпроводящих электронов (в теории БКШ - время распада куперовских пар), которое согласно [1] оценивается как $t_\Delta < 10^{-12}$ секунд.

На основании выражения (6) можно сделать вывод, что для сверхпроводящего защитного устройства выполняется условие

$$v_n(t) > v_\phi(t), \quad (7)$$

что говорит об отсутствии инерционности защитного устройства, т.е. большее значение величины $v_n(t)$ по сравнению с $v_\phi(t)$ не дает возможности проникновения опасного сигнала через сверхпроводящее защитное устройство.

Нелинейное изменение величины активного сопротивления сверхпроводящей полоски $\mathbf{R}_{s-n}(t)$ от нуля до величины \mathbf{R}_n , что предполагает возможность проникновения опасного сигнала, особенно в интервале времени, когда $\mathbf{R}_{s-n}(t) \ll \mathbf{R}_n$.

Выражение для мощности электромагнитного воздействия на выходе защитного устройства (сверхпроводящей полоски) можно определить на основании работы [1]

$$P_{s-n}(t) = v_n(t) \left(\frac{3\rho_n l t_\Delta I_{c1} I_{c2}}{2W\lambda^2} \right). \quad (8)$$

Входная мощность электромагнитного воздействия определяется

$$P_{\text{вх}}(t) = (u_1(t)^2)/R_n, \quad (9)$$

где R_n - сопротивление нагрузки (50 Ом).

Сопоставляя (8) и (9), получаем соотношение

$$P_{\text{s-n}}(t) = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{вх}}(t) U_m R_n (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t})}{A}} \right), \quad (10)$$

где $A = \frac{\rho_n l}{S I_{c2}}$.

Таким образом, согласно (10), для сверхпроводящего защитного устройства в момент фазового S - N перехода выполняется неравенство

$$P_{\text{s-n}}(t) \ll P_{\text{вх}}(t). \quad (11)$$

Определим степень ослабления опасного сигнала защитным устройством, находящимся в несверхпроводящем состоянии.

Учитывая, что в N - состоянии активное сопротивление R_n на три порядка превышает сопротивление нагрузки, мощность ослабленного опасного сигнала на выходе защитного устройства можно записать

$$P_n(t) = U_m^2 \frac{e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}}{R_n} \quad (12)$$

или

$$P_n(t) = P_{\text{вх}}(t) \frac{R_n}{R_n}. \quad (13)$$

Учитывая, что $R_n \gg R_n$, можно записать

$$P_{\text{вх}} \gg P_n. \quad (14)$$

То есть степень ослабления входного сигнала определяется величиной активного сопротивления сверхпроводящей полоски в N состоянии, чего можно достигнуть, увеличив ее длину.

Выражения (7), (11), (14) можно объединить в систему неравенств характеризующих работу сверхпроводящего защитного устройства и эффективность его применения

$$\begin{cases} v_n(t) \geq v_{TM}(t), t_{c1} \leq t < t_{c2}; \\ P_{s-n}(t) \ll P_{\%o}(t), t_{c1} \leq t < t_{c2}; \\ P_n(t) \ll P_{\%o}(t), t_{c1} \leq t < t. \end{cases} \quad (15)$$

где t_{c1} , t_{c2} - времена достижения током величин I_{c1} и I_{c2} соответственно;
 t_n - длительность МЭМИ.

Таким образом, применение сверхпроводящих защитных устройств для защиты РЭА от мощных электромагнитных излучений малой длительности, является наиболее эффективным по сравнению как с газоразрядными, так и полупроводниковыми устройствами защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучер Д. Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства .- Севастополь: Ахтиар, 1997. - 188 с.
2. Мырова Т. О., Чепиженко А. З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям.- М.: Радио и связь, 1988. - 296 с.
3. Аксаев Э.Е., Гершензон Е.М. и др. Механизмы детектирования электромагнитного излучения в пленках $YBa_2Cu_3O_7$. - СФХТ, 1990. - N8. - С. 1928 - 1942.
4. Березинец В.М., Кучер Д.Б. и др. Скорость фазового S - N перехода сверхпроводящего защитного устройства // Информационные системы. - Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1997. - Вып. 1(5). - С. 77 - 82.