

УДК 621.396.6

Л.В. Литвиненко

Севастопольский национальный технический университет, Севастополь

## МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОДИНОЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВХОДНЫХ ТРАКТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе проведена оценка энергетического воздействия одиночного мощного импульсного излучения на чувствительные элементы входного тракта УКВ радиостанции. Получены зависимости энергии, рассеивающейся в полупроводниковых структурах входных цепей, от расстояния до точки излучения.

**Ключевые слова:** мощные электромагнитные излучения, электромагнитная стойкость радиотехнических систем, критическая энергия повреждения.

### Введение

Прохождение части энергии мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) через антенно-фидерные устройства (АФУ) систем приема и передачи информации является одной из основных причин выхода из строя чувствительных элементов радиотехнических систем (РТС) и искажения информации в приемных трактах.

При оценке влияния МЭМИ на тракты приёмной аппаратуры наибольший интерес представляет решение следующих задач: оценка полной энергии, амплитуды и формы воздействия на нагрузку в полосе пропускания приемного тракта, предварительная оценка возможных последствий, вызванных прохождением части энергии МЭМИ через АФУ [1].

В результате решения первой задачи в работе [2] показано, что при прохождении через АФУ экспоненциальный импульс МЭМИ значительно изменяет свою форму, принимая вид затухающих колебаний. Это обусловлено наличием резонансных явлений в антенне и фидере, вызывающих колебательный процесс при прохождении сигнала.

Не менее важной задачей является оценка возможных повреждений элементной базы современных РТС при воздействии МЭМИ.

### Основной материал

Электромагнитная стойкость РТС к воздействию импульсных МЭМИ определяется стойкостью ее наиболее чувствительных элементов. В антенно-фидерном тракте такими элементами являются полупроводниковые приборы (ППП) и интегральные микросхемы (ИМС). Основные отказы этих изделий связаны с электрическими (влияющими на величину распределения токов в структуре прибора) и тепловыми (определяющими повышение температуры отдельных участков этой структуры) процессами [2].

Наиболее распространенными повреждениями ППП являются различные виды пробоев и структурных повреждений р-п переходов, а также по-

верхностные перекрытия активных элементов (кристаллов), приводящие к их частичному или полному разрушению. На практике стойкость ППП к воздействию импульсных МЭМИ длительностью  $\tau \leq 0.1$  мкс характеризуют критической энергией повреждения  $W_{кр}$ . Значения критической энергии повреждения некоторых ППП приведены в табл. 1 [1,2].

Таким образом, для оценки возможных повреждений современных РТС при воздействии МЭМИ необходимо определить энергию, рассеивающуюся в наиболее чувствительных ее элементах. После чего произвести сравнение полученных значений энергии с критическими для данного элемента.

Таблица 1  
Значения критической энергии повреждения ППП

| Тип ППП                   | Критическая энергия повреждения, Дж |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Кремниевый выпрямитель    | $(1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$         |
| Туннельный диод           | $(1 \dots 8) \cdot 10^{-5}$         |
| Высокочастотный диод      | $(1 \dots 5) \cdot 10^{-8}$         |
| Низкочастотный транзистор | $(2 \dots 6) \cdot 10^{-5}$         |
| Интегральная микросхема   | $(8 \dots 10) \cdot 10^{-7}$        |

Для длительности импульсов МЭМИ более 100 нс критериальный уровень поражения (значение мощности  $P_n$  и энергии  $W_n$ , разрушающей структуру в результате тепловыделения) достаточно хорошо оценивается классической тепловой моделью Wunsch-Bell (W-B) деградации полупроводниковых приборов [3]. Однако, для импульсов, длительность которых лежит в диапазоне единиц-десятков нс, модель W-B неприменима.

Рассмотрим воздействие импульса МЭМИ длительностью 15 нс и формой, представленной на рис. 1, на входные цепи УКВ радиостанции Р-005 (рис. 2) [4]. Входные цепи современных приемно-передающих устройств представляют собой одну или несколько микросхем, элементная база которых включает в себя большое количество полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов), имеющих высокую чувствительность к внешним воздействующим полям (табл. 1).

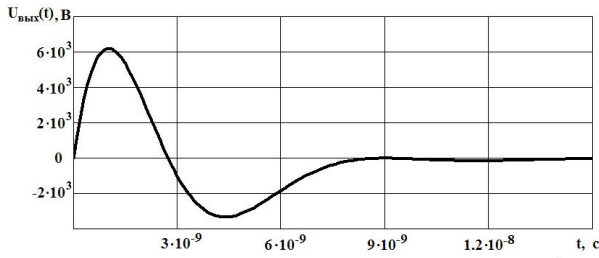


Рис. 1. Временная форма импульса МЭМИ на нагрузке АФУ

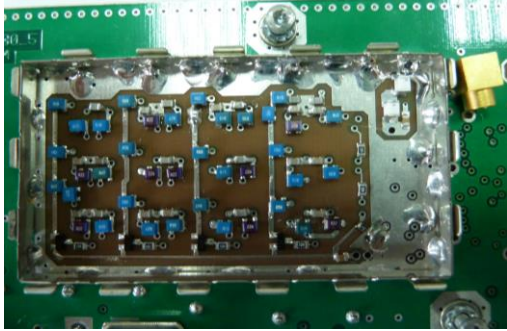


Рис. 2. Входные цепи радиостанции P-005

Рассчитаем энергию, рассеивающуюся в р-п переходе, например, полупроводникового ключа, при воздействии одиночного импульса МЭМИ.

Учитывая, что временная форма импульса МЭМИ на нагрузке АФУ

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{U_{\text{max}} R_n \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sinh(kt) \times (2 - C_a \cdot R_n \cdot a_1 - C_a \cdot R_i \cdot a_1)}{2 \cdot k \cdot L_p (1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 (R_i + R_n))} - \frac{U_{\text{max}} R_n \cdot C_a \cdot a_1 \cdot (e^{-a_1 t} - e^{-\alpha t} \cosh(kt))}{1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 (R_i + R_n)}, \quad (1)$$

энергия на нагрузке будет определяться как

$$W = \int_0^{\tau_{\text{и}}} \left[ \frac{U_{\text{max}} e^{-\alpha t} \sinh(kt) (2 - C_a \cdot R_n \cdot a_1 - C_a \cdot R_i \cdot a_1)}{2 \cdot k \cdot L_p (1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 (R_i + R_n))} - \frac{U_{\text{max}} \cdot C_a \cdot a_1 \cdot (e^{-a_1 t} - e^{-\alpha t} \cdot \cosh(kt))}{1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n)} \right]^2 \cdot R_{p-n} dt, \quad (2)$$

где  $C_a$  – ёмкость антенны относительно земли,  $L_p$  – индуктивность, которая образует с ёмкостью антенны резонансный контур на частоте первого резонанса,  $R_i$  – сопротивление излучения,  $R_n$  – сопротивление нагрузки,  $U_{\text{max}} = E_{\text{max}} \cdot h/2$  – амплитуда импульса,  $E_{\text{max}}$  – напряженность электрического поля МЭМИ,  $h$  – длина излучающей антенны,  $a_1 = 0.7 / \tau_{\text{и}}$  – коэффициент, определяемый длительностью воздействия,

$$k = \sqrt{\frac{C_a \cdot R_i^2 + 2 \cdot C_a \cdot R_i \cdot R_n + C_a \cdot R_n^2 - 4 \cdot L_p}{4 \cdot C_a \cdot L_p^2}},$$

$\alpha = (R_n + R_i) / (2 \cdot L_p)$  – коэффициенты, учитывающие параметры антенны,  $R_{p-n} = \rho \cdot l / S$  – сопротивление р-п перехода,  $\rho = l / \sigma_0 \cdot \exp(-E_z / (2 \cdot k \cdot T))$  – удельное сопротивление полупроводника,  $\sigma_0$  – проводимость полупроводника при 0°C,  $E_z$  – ширина запрещенной зоны,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $l$  – длина р-п перехода,  $S$  – площадь р-п перехода.

Проинтегрировав выражение (2), получим:

$$W = \left[ \frac{(2Y + Z) \cdot [\exp(-\tau_{\text{и}}(a_1 + \alpha - k)) - 1]}{2(a_1 + \alpha - k)} + \frac{(2Y - Z) \cdot [\exp(-\tau_{\text{и}}(a_1 + \alpha + k)) - 1]}{2(a_1 + \alpha + k)} - \frac{(X + Y - Z) \cdot [\exp(-2\tau_{\text{и}}(\alpha + k)) - 1]}{8(\alpha + k)} - \frac{(X + Y + Z) \cdot [\exp(-2\tau_{\text{и}}(\alpha - k)) - 1]}{8(\alpha - k)} + \frac{(X - Y) \cdot [e^{-2\alpha\tau_{\text{и}}} - 1]}{4\alpha} - \frac{Y \cdot [e^{-2a_1\tau_{\text{и}}} - 1]}{2a_1} \right] \cdot R_{p-n}, \quad (3)$$

где

$$X = \frac{U_{\text{max}}^2 (2 - C_a \cdot R_n \cdot a_1 - C_a \cdot R_i \cdot a_1)^2}{[2 \cdot k \cdot L_p (1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 (R_i + R_n))]^2},$$

$$Y = \frac{(U_{\text{max}} \cdot C_a \cdot a_1)^2}{[1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n)]^2},$$

$$Z = \frac{U_{\text{max}}^2 \cdot C_a \cdot a_1 \cdot (2 - C_a \cdot R_n \cdot a_1 - C_a \cdot R_i \cdot a_1)}{k \cdot L_p (1 + C_a \cdot L_p \cdot a_1^2 - C_a \cdot a_1 \cdot (R_i + R_n))^2} -$$

коэффициенты, учитывающие характеристики АФУ и параметры импульса МЭМИ.

Зависимость энергии, рассеивающейся в р-п переходе полупроводникового ключа входного тракта УКВ радиостанции P-005, от длительности импульса МЭМИ представлена на рис. 3.

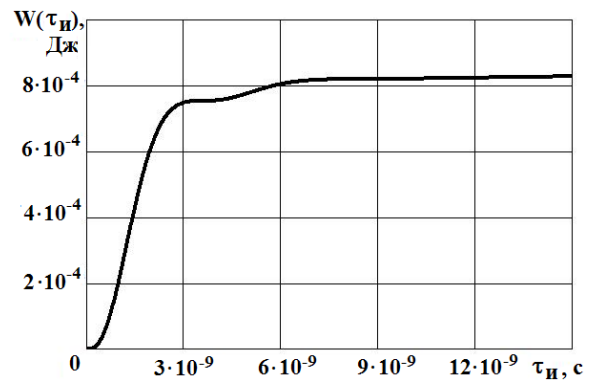


Рис. 3. Зависимость энергии, рассеивающейся в р-п переходе ППП, от длительности импульса МЭМИ

В результате анализа зависимости, представленной на рис. 3, можно сделать вывод, что максимальный уровень энергии, рассеивающейся в р-п переходе за время действия импульса МЭМИ, составляет  $W_{\max} = 8.2 \cdot 10^{-4}$  Дж.

Сравнив полученные результаты с данными табл. 1, определяющими значения критической энергии повреждения ППП, необходимо отметить, что уровни энергии будут достаточными для вывода их из строя.

Зависимость, представленная на рис.3, построена для случая воздействия источника МЭМИ на расстоянии 25 метров от объекта.

В работе [5] показано, что для дальней зоны излучения ( $r \gg \lambda$ ) амплитуды напряженностей электромагнитного поля (поражающие факторы МЭМИ) убывают обратно пропорционально первой степени расстояния от точки излучения:

$$E_{\text{фм}} = \frac{I_{\text{max}} S_{\text{в}} \omega \mu_a \eta}{2\lambda r} \sin \theta, \quad (4)$$

где  $I_{\text{max}}$  – максимальное значение электрического тока источника МЭМИ,  $S_{\text{в}}$  – площадь излучающего элемента,  $\omega$  – резонансная частота излучающей системы,  $\mu_a$  – магнитная проницаемость среды,  $\lambda$  – длина волны МЭМИ или ее эквивалент для импульсного излучения,  $r$  - расстояние от точки излучения,  $\theta = \frac{\pi}{4}$  – угол излучения,  $\eta$  – коэффициент полезного действия (эффективность) излучающей антенны.

Уменьшение амплитуды напряженности электрического поля МЭМИ с расстоянием оказывает непосредственное влияние на энергетические характеристики импульсного воздействия.

Оценка энергии, рассеивающейся в р-п переходе полупроводникового ключа входного тракта, с учетом расстояния от источника МЭМИ возможна путем подстановки зависимости (4), определяющей амплитудные значения напряженности электрического поля, в выражение для расчета энергии (3).

Для импульса МЭМИ длительностью  $\tau_{\text{и}} = 15 \cdot 10^{-9}$  с и формой, представленной на рис. 1, зависимость максимальной энергии, рассеивающейся в р-п переходе, от расстояния до точки излучения представлена на рис. 4.

### Выводы

Таким образом, в непосредственной близости от точки излучения (до 50 м) максимальные значения рассеивающейся энергии будут составлять порядка  $W_{\max} = 2 \cdot 10^{-4}$  Дж, что является достаточным для поражения РТС.

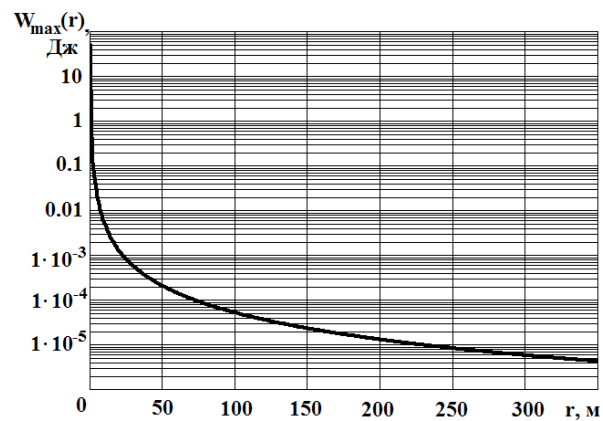


Рис. 4. Зависимость максимальной энергии, рассеивающейся в р-п переходе полупроводникового ключа при воздействии МЭМИ, от расстояния до точки излучения

В то же время с увеличением расстояния от источника излучения энергетическое воздействие мощных электромагнитных излучений на чувствительные элементы РТС ослабевает ввиду того, что величины рассеивающейся энергии становятся низкими ( $W_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$  Дж на расстоянии 300 м от точки излучения) по сравнению с критическими значениями, вызывающими функциональное поражение (см. табл.1).

В связи с этим перспективным направлением исследования является анализ воздействия на РТС полиимпульсных мощных электромагнитных излучений, обладающих более высокими энергетическими характеристиками.

### Список литературы

1. Кучер Д.Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства / Д.Б. Кучер. – Севастополь: Ахтиар, 1997. – 188с.
2. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
3. Wunsch D.S, Bell R.R. Determination of threshold failure level of semiconductors diodes and transistors due to pulse voltage / D.S. Wunsch, R.R. Bell // IEEE Trans. on Nuclear Sci. – 1968. – Vol. 15, N 6. – P. 244 – 259.
4. Радиостанция УКВ носимая 5 Вт. Руководство по эксплуатации №ААНЗ.464424.019 РЭ.
5. Особенности генерирования мощных электромагнитных помех спиральным взрывомагнитным генератором / Д.Б. Кучер, С.В. Тараненко, А.И. Харланов, Ю.М. Бусяк // Системи обробки інформації. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2009. – Вип. 4(78). – С. 86 – 90.

Поступила в редколлегию 1.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. Д.Б. Кучер, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.

**МОДЕЛЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВПЛИВУ ОДИНОЧНИХ ІМПУЛЬСНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ  
НА ІНТЕГРАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ ВХІДНОГО ТРАКТУ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Л.В. Литвиненко

*У роботі проведена оцінка енергетичного впливу одиночного потужного імпульсного випромінювання на чутливі елементи вхідного тракту УКХ радіостанції. Отримано залежності енергії, що розсіюється в напівпровідникових структурах вхідних ланцюгів, від відстані до точки випромінювання.*

**Ключові слова:** *потужні електромагнітні випромінювання, електромагнітна стійкість радіотехнічних систем, критична енергія пошкодження.*

**A MODEL OF THE ENERGY IMPACT OF SINGLE PULSE RADIATION ON INTEGRAL ELEMENTS  
OF THE INPUT TRACT RADIO SYSTEMS**

L.V. Litvinenko

*An assessment of the energy impact of a single high-power pulsed radiation on the sensor input channel VHF radio is presented in this work. The dependences of the energy dissipated in semiconductor input circuits, the distance from the point of emission are obtained.*

**Keywords:** *powerful electromagnetic radiation, electromagnetic resistance radio systems, the critical energy of the damage.*