

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ РПУ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

А.И. Фык, А.В. Савич, С.В. Ольховиков
(Харьковский Университет Воздушных Сил)

Приведены методики исследований состояния входных цепей РПУ при воздействии электромагнитного импульса (ЭМИ) ядерного взрыва (ЯВ) и разработаны требования к быстродействию создаваемых средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от мощных электромагнитных воздействий.

состояние входных цепей, ядерный взрыв, средства защиты радиоэлектронной аппаратуры

Основным содержанием боевых действий в современных условиях может явиться ядерное нападение со стороны вероятного противника. В этой связи, одной из основных задач является создание вооружения и военной техники (ВВТ), способных надежно выполнить свои боевые задачи в условиях многократного воздействия поражающих факторов при ядерных взрывах. ЭМИ является активным поражающим фактором, в первую очередь, электронного и электротехнического оборудования ВВТ. Впервые фундаментальная физическая модель формирования ЭМИ при атомном взрыве рассмотрена в работе [1] без учета влияния геомагнитного поля Земли. Сущность формирования ЭМИ состоит в том, что при ЯВ из области взрыва испускается значительное количество мгновенных гамма-квантов, которые, взаимодействуя с атомами среды, окружающей область взрыва, выбивают из них быстрые комптоновские электроны. Электроны, двигаясь в направлении порождающих их гамма-квантов, создают упорядоченный ток комптоновских электронов, но воздух в окрестности взрыва становится проводящим, что способствует возникновению токов проводимости, которые стремятся скомпенсировать действие комптоновских электронов. Уровень напряженности результирующего электрического поля, образующегося в результате этих процессов, определяется соотношением комптоновских электронов и током проводимости. Таким образом, в области пространства, окружающей ядерный взрыв, происходит распределение зарядов и токов. Ввиду того, что распределение этих зарядов и токов оказывается несимметричным относительно центра взрыва, это приводит к возникновению импульсного электромагнитного поля.

Антенны и фидеры являются важнейшими элементами высокочастотного оборудования систем связи [1, 4]. Антенны должны иметь максимально возможный коэффициент усиления и быть хорошо согласованы с их фидерами, а также обладать высоким защитным действием от различных помех, в том числе и от ЭМИ.

Исследования подтвердили [1, 2], что при высотных ЯВ, приведенные в табл. 1 потенциалы наводятся на расстоянии сотен и даже тысяч километров, и уровень энергии, проникающей через антенны и инерционные (единицы наносекунд) защитные устройства в полосе приёма, достаточный (10^{-6} – 10^{-1} Дж) для поражения не только его полупроводниковой базы, но и входных цепей, по которым канализируется энергия к РПУ.

Таблица 1

Значение параметра для импульса поля

Параметр	Значение параметра для импульса поля	
	электрического	магнитного
Максимальная напряжённость поля	50 кВ/м	30 кА/м
Длительность импульса, нс	5	5
Время нарастания от 0,1 до максимального значения, нс	10	10
Длительность импульса на уровне напряжённости 0,5, нс	200	200

Целью предложенной методики является исследование состояния входных цепей радиоприёмных устройств (РПУ) ВВТ при воздействии ЭМИ ЯВ для разработки требований к быстродействию создаваемых средств защиты.

Известно, [1] что при протекании тока $I(t)$ через проводник сечением S и объемом V с удельной теплоемкостью γ , рост температуры T во времени t описывается уравнением

$$\gamma \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = I^2(t) \cdot r, \quad (1)$$

где $r = \rho \frac{\ell}{S}$ – сопротивление проводника, Ом; $V = S\ell$ – объем материала проводника, м³; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом/м.

$$\text{Тогда} \quad \gamma \cdot \ell \cdot S \frac{dT}{dt} = I^2(t) \rho \frac{\ell}{S} \quad \text{или} \quad \gamma \frac{dT}{dt} = \frac{I^2(t)}{S^2} \cdot \rho, \quad (2)$$

где $\frac{I^2(t)}{S^2} = J^2(t)$ – квадрат плотности тока.

$$\text{Проинтегрировав обе части (2), получим:} \quad \int_0^{t_0} \frac{\gamma}{\rho} dT = \int_0^{t_0} J^2(t) dt, \quad (3)$$

где t_0 – время, в течение которого можно пренебречь теплоотдачей.

Величина интеграла от квадрата плотности тока зависит лишь от свойств материала, из которого сделана катушка, в том числе от температуры его плавления. Этот интеграл имеет всегда определенную величину и представляет его абсолютную постоянную.

$$\int_0^{t_0} J^2(t) dt = W^* \left[\frac{A^2 \cdot c}{\text{см}} \right], \quad (4)$$

где W^* – значение интеграла от квадрата плотности тока, при котором перегорает катушка.

Для перегорания катушки требуется определенное время.

Суммарная величина W^* до момента испарения металла составляет: для серебра $W_c^* = 8,0 \cdot 10^8 \text{ A}^2\text{c}/\text{см}^4$; для меди $W_m^* = 11,72 \cdot 10^8 \text{ A}^2\text{c}/\text{см}^4$.

В каждом конкретном случае, вычисляя значение интеграла от квадрата плотности тока, протекающего через катушку индуктивности за определенное время и сравнивая полученное значение с постоянной величиной W^* (для каждого металла свое значение). Катушка перегорает если $W \geq W^*$.

Величина значения интеграла от квадрата плотности тока во времени W зависит от амплитуды и формы тока, обусловленного действием наводимой ЭДС, и тогда будет рассчитана для любых фиксированных моментов времени. Это позволяет предъявить требования к быстродействию устройств защиты.

1. Исследование переходных процессов во входных цепях РПУ.

1.1. Переходные процессы в проводниковых входных цепях. Вычисление W связано с определением амплитуды и формы импульсного тока во входной цепи. Для исследования переходных процессов во входной цепи применим метод интеграла Дюамеля. В исследуемой цепи ЭДС $\xi_{1-2}(t)$ приложена к элементам входной цепи (рис. 1).

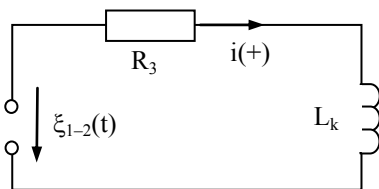


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная схема входной цепи РПУ

при ЭДС $\xi_{1-2}(t)$ приложена к элементам входной цепи (рис. 1).

Переходная характеристика $R_3 L_k$ с постоянной времени $\tau_L = L_k / R_3$ определяется выражением:

$$H(t) = (1/R_3) \cdot (1 - \exp(-t/\tau_L)). \quad (5)$$

Выражение для выходной функции запишется в виде:

$$I(t) = \xi'_{1-2}(0) \cdot H(t) + \frac{1}{R_3} \int_0^t \xi'_{1-2}(\Theta) (1 - e^{-\frac{t-\Theta}{\tau_L}}) d\Theta. \quad (6)$$

Для ЭДС, наведенной в АФУ при действии ЭМИ ЯВ $\xi_{1-2}(0) = 0$. Тогда

$$I(t) = \frac{1}{R_3} \int_0^t \xi'_{1-2}(\Theta) (1 - e^{-\frac{t-\Theta}{\tau_L}}) d\Theta. \quad (7)$$

В общем случае форма импульса наводимой в АФУ ЭДС отличается от формы воздействующего поля с достаточной для практики точностью. Форма ЭДС в АФУ описана выражением [1]:

$$\frac{\xi(t)}{\xi_{\max}} = K(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}). \quad (8)$$

Из всего многообразия дипольных антенн (вibratorов) будет рассмотрен наиболее распространенный их вид – несимметричный vibrator, находящийся над поверхностью земли. Его условная модель и переход от модели к квазистатической эквивалентной схеме Тевенина показаны на рис. 2 [2, 4].

Под действием продольной, по отношению к оси vibratorа, составляющей напряженности электрического поля (E_{\max}) в антенне будет наводиться ЭДС с амплитудой [4]:

$$\xi_{A\max} = E_{\max} \cdot h_d.$$

При этом максимальные значения ЭДС в антенне $\xi_A^* \max$ вычисляются с учетом возрастания в $K_{\phi\max}$ раз амплитуды напряженности воздействующего поля при отражении от Земли и с учетом увеличения амплитуды ЭДС в $K_{h\max}$ раз при появлении резонансных свойств антенны [2, 3]

$$\xi_{A\max}^* = \xi_{A\max} \cdot K_{\phi\max} \cdot K_{h\max}, \quad (9)$$

где h_d – действующая высота антенны.

Тогда

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{K \cdot \xi_{A\max}^*}{R} \cdot \int_0^t (\beta \cdot e^{-\beta\Theta} - \alpha \cdot e^{-\alpha\Theta}) (1 - e^{-\frac{t-\Theta}{\tau_L}}) d\Theta = \\ &= \frac{K \cdot \xi_{A\max}^*}{R} \cdot \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} - \frac{\beta \cdot \tau_L}{1 - \beta \cdot \tau_L} \cdot \exp\left(-\frac{(\beta \cdot \tau_L^2 - \tau_L + 1)t}{\tau_L}\right) + \right. \\ &\left. + \frac{\beta \cdot \tau_L}{1 - \beta \cdot \tau_L} e^{-\frac{t}{\tau_L}} + \frac{\alpha \cdot \tau_L}{1 - \alpha \tau_L} \exp\left(\frac{(\alpha \tau_L^2 - \tau_L + 1) \cdot t}{\tau_L}\right) e^{-\frac{\alpha \cdot \tau_L}{1 - \alpha \cdot \tau_L} t} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

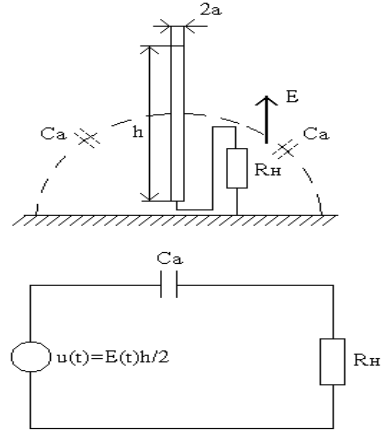


Рис. 2. Несимметричный vibrator над землей (а) и его квазистатическая эквивалентная схема замещения (б)

1.2. Переходные процессы в СВЧ-волноводах РПУ.

На практике СВЧ проводники, по которым принимаемые сигналы поступают из антенных систем в РПУ, заменяются сложными эквивалентными схемами. Рассмотрим, к примеру, нагруженный коаксиально-волноводный переход (КВП), рис. 3, 4 [6]. Если предположить, что входное воздействие имеет форму (8) то при $K = \zeta_m$ и $\alpha = a_1; \beta = a_2$ оно примет вид [3, 5]:



Рис. 3. СВЧ входное устройство перед РПУ

$$\zeta(t) = \zeta_m (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}). \quad (11)$$

Тогда дифференциальное уравнения для эквивалентной схемы (рис. 3) [5]

$$R_1 C \frac{dU_c}{dt} + \frac{R_1}{R_2} U_c + LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{L}{R_2} \frac{di_3}{dt} + U_c = \zeta. \quad (12)$$

Таким образом, в операторной форме (12) перепишется так:

$$U_c(p) = \frac{\zeta_m (a_2 - a_1)}{LC(p + a_1)(p + a_2) \left(p^2 + \left(\frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2 C} \right) p + \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2 LC} \right) \right)}. \quad (13)$$

Используя программу МАТНСАД-11, определяем $u(t)$ [5]:

$$u(t) = \zeta_m \cdot (A_1 e^{-a_1 t} + A_2 e^{-a_2 t} + A_3 e^{-\alpha t} \text{sh}(\alpha_1 t) + A_4 e^{-\alpha t} \text{ch}(\alpha_1 t)), \quad (14)$$

где $\alpha_1 = \frac{1}{2} \frac{K_3}{\sqrt{R_2^2 L^2 C^2}}$;

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} \frac{(R_1 R_2 C + L)}{R_2 LC};$$

$$A_1 = R_2 / K_1; \quad A_2 = R_2 / K_2;$$

$$A_3 = (a_2 - a_1) K_4 \left[R_2^2 LC [R_2 LC (a_1 + a_2) (CR_2 R_1 + L) + K_5] \right];$$

$$A_4 = (a_2 - a_1) R_2 K (-R_2 LC a_1 - R_2 LC a_2 + R_2 CR_1 L + L),$$

$$K_1 = R_1 - a_1 R_2^2 C - a_1 L + a_1^2 R_2 LC + R_2;$$

$$K_2 = -a_2 R_2 R_1 C - a_2 L + a_2^2 R_2 LC + R_1 + R_2;$$

$$K_3 = \sqrt{4CLR_2^2 + 2R_1 R_2 CL - R_1^2 R_2^2 C^2 - L^2};$$

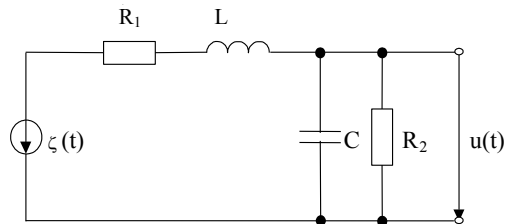


Рис. 4. Эквивалентная схема СВЧ входного устройства

$$K_4 = K / \left(-K_3 \sqrt{R_2^2 L^2 C^2} \right);$$

$$K_5 = -R_2^2 C^2 R_2^2 + 2R_2^2 LC - L^2 - 2R_2^2 L^2 C^2 a_1 a_2; \quad K = 1 / K_1 K_2;$$

$$i_{R2}(t) = \frac{u(t)}{R_2} = \frac{\zeta m}{R_2} (A_1 e^{-a_1 t} + A_2 e^{-a_2 t} + A_3 e^{-\alpha t} \operatorname{sh}(\alpha_1 t) + A_4 e^{-\alpha t} \operatorname{ch}(\alpha_1 t)). \quad (15)$$

И, как следует из сравнения (10) и (15), для реальных значений величин τ_L входных цепей РПУ, в выражении можно ограничиться двумя первыми членами (10) и (15), так как в силу малости остальных слагаемых в $I(t)$ и $i_{R2}(t)$ (для схемы рис. 3) их вклад незначителен. Это позволяет сделать вывод о том, что постоянная входных цепях РПУ (τ_L , α) не влияет на форму импульсного тока, протекающего во входных цепях РПУ под действием наведенной в АФУ ЭДС. Согласно (4) W за время разрушения переходника от волновода к коаксиальному кабелю имеет вид, представленный на рис 5, при воздействии ЭМИ [5].

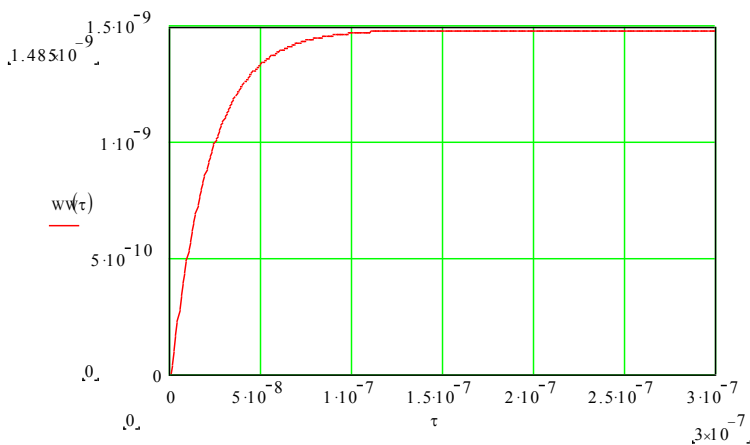


Рис. 5. Изменение энергетического параметра W

2. Определение показателей стойкости входных цепей РПУ к действию ЭМИ ЯВ.

С учетом сделанного вывода (10) $\int_0^{t_0} J^2(t) dt = W^* \left[\frac{A^2 \cdot c}{\text{см}} \right]$ принимает

вид для схемы, например, на рис 1:

$$W = \frac{\xi A_{\max}^*}{R^2 \cdot S^2} \cdot K^2 \int_0^t (e^{-2\alpha \cdot t} - 2e^{-(\alpha+\beta) \cdot t} + e^{-2\beta \cdot t}) dt =$$

$$= \frac{\xi_{Amax}^{*2}}{R^2 \cdot S^2} \cdot K^2 \cdot \left[-\frac{1}{2\alpha} \cdot e^{-2\alpha \cdot t} + \frac{1}{2\alpha} + \frac{2}{\alpha + \beta} \cdot e^{-(\alpha + \beta)t} + \frac{2}{\alpha + \beta} - \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot e^{-2\beta t} + \frac{1}{2 \cdot \beta} \right], \quad (16)$$

где R – активное сопротивление электрической цепи (рис. 1), Ом; S – сечение провода входной цепи РПУ, см²; ξ_{Amax}^* – максимальное значение ЭДС в АФУ, В; t – текущее время, с.

Это выражение является рабочей формулой для вычисления W , являющейся функцией нескольких аргументов $W = f(\xi_{Amax}^*, R, S, t, K)$.

В квадратных скобках выражения используются переменные, являющиеся функцией времени, которую обозначим через $\Phi(t)$, тогда

$$W = \frac{\xi_{Amax}^{*2}}{S^2 \cdot R^2} \cdot K^2 \Phi(t). \quad (17)$$

Выбранный критерий стойкости $W \geq W^*$ с учетом (17) примет вид:

$$\xi_{Amax}^* < \xi_{Amaxпред}^* = \sqrt{\frac{W^*}{\Phi(t)}} \cdot \frac{R \cdot S}{K} [B]. \quad (18)$$

Критерий стойкости РПУ, выраженный через напряженность внешнего поля запишется в виде (для рис. 1 и 3):

$$E_{max} < E_{maxпред} = \frac{\xi_{Amaxпред}^*}{h_d} = \frac{W^*}{\Phi(t)} \cdot \frac{R \cdot S}{K \cdot h_d} [B/M], \quad (19)$$

где h_d – действующая высота антенны (или штыря коаксиально-волноводного перехода).

Экспериментальные значения $\Phi(t)$ для высотного ЯВ (табл. 1) представлены на рис. 5. Полученные значения $\Phi(t)$ для фиксированных моментов времени позволяют определить требуемое быстродействие срабатывания защитных устройств (рис. 6).

Выводы. 1. Отраженное от поверхности Земли электромагнитное излучение ВЯВ оказывает существенное влияние на амплитудно-временные характеристики результирующего поля, усиливая его поражающие действия на радиотехнические средства и создавая более напряженные условия функционирования объектов РТС. При этом амплитудные значения напряженности полей могут увеличиваться в 1,4 раза, а общее количество энергии в импульсе на 25 – 40 %;

2. Оценка параметров ЭДС, наводимой ЭМИ высотного ЯВ в АФУ радиосредств указывает на существенные изменения формы ЭДС по сравнению с формой воздействующего поля. Эти изменения, обусловленные частотными и резонансными свойствами АФУ, выражаются в увеличении длительности переднего фронта импульса, увеличения мак-

симального значения наведенной ЭДС, в появлении высокочастотных колебательных процессов.

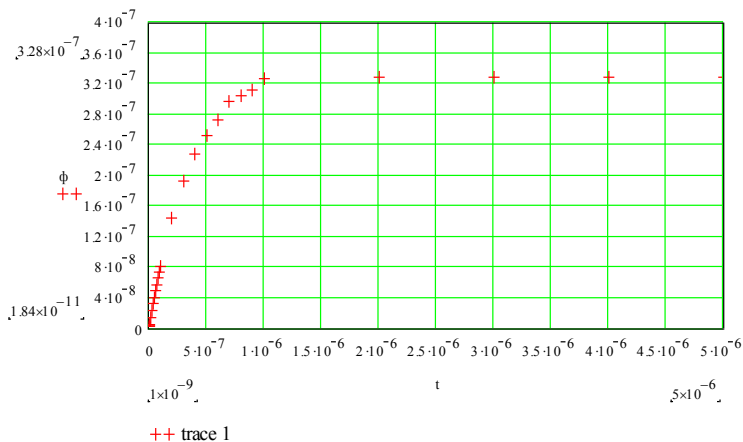


Рис. 6. Значения $\Phi(t)$ для высотного ЯВ

Проведенные исследования позволяют повысить требования к быстродействию защитных устройств (время переключения менее десяти пикосекунд) и условием изоляции элементов антенно-фидерного тракта с целью предотвращения возможности возникновения дугового разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рюденберг Р. *Переходные процессы в электроэнергетических системах*. – М.: Н.Л., 1955. – 714 с.
2. *Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов* / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. радио, 1972. – С. 149 – 160.
3. Ширман Я.Д. *Радиоволноводы и объемные резонаторы*. – М.: Радио и связь, 1959. – С. 156 – 161.
4. Шубарин Ю.В. *Антенны сверхвысоких частот* // Вестник ХГУ. – 1960. – С. 7 – 8.
5. Березинец В.М., Кучер Д.Б., Фык А.И. *Экспериментальное исследование коаксиально-волноводного перехода* // Радиозлектроника и информатика. – 1999. – Вып. 2. – С. 21 – 22.

Поступила 19.10.2005

Рецензент: кандидат технических наук, профессор Г.Ф. Коняхин,
Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.