

Новый принцип имитации деструктивного воздействия сверхмощных электромагнитных импульсов на электронную аппаратуру через кабельные линии

Владимир БУЛЕКОВ,
д. т. н.
Станислав РЕЗНИКОВ,
д. т. н.
Вячеслав БОЛДЫРЕВ,
к. т. н.
Людмила ДИКАНОВА,
к. т. н.
Владимир БОЧАРОВ,
к. т. н.
Александр МИЛОСЛАВСКИЙ

В качестве наиболее эффективного принципа компактной, экономичной и малотрудоемкой имитации деструктивного воздействия сверхмощных ЭМИ (СЭМИ) авторы предлагают использовать новый принцип «интегрального импульса», основанный на эквивалентной по результату замене реального СЭМИ последовательностью из нескольких менее мощных подобных индукционных ЭМИ с энергией, превышающей критический уровень начального необратимого разрушения микроструктур исследуемых электронных объектов.

Современные технологии и средства коммуникации основаны на устройствах электроэнергетики и электроники, содержащих многочисленные кабельные линии и антенны, которые весьма уязвимы для электромагнитных помех и мощных импульсных возмущений, вызывающих сбои, отказы и даже разрушения электротехнических комплексов.

Электромагнитные импульсы (ЭМИ), способные индуцировать в кабельных линиях и антеннах ЭДС и токи, превышающие допустимые значения и вызывающие необратимые разрушения в элементах электронного оборудования, принято выделять как сверхмощные (СЭМИ). К источникам их генерации наиболее часто относят молнии, ядерные взрывы (ЯВ) и «электромагнитные бомбы» («Е-бомбы»).

Источники генерации сверхмощных индукционных ЭМИ в кабельных линиях

ЭМИ молнии

Практически все стационарные и транспортные электроэнергетические и информационно-управляющие комплексы в той или иной степени могут быть подвержены воздействию сверхмощных электромагнитных импульсов, создаваемых молнией. Ежесекундно на земном шаре происходит около 100 ударов молнии. Для нашей страны среднее число ударов молнии в 1 км² поверхности земли

за 100 грозовых часов составляет 6,71 [1, 2]. Каждый гражданский самолет в процессе эксплуатации подвергается в среднем одному разряду молнии [3]. Фирма «Боинг» провела исследования методов защиты элементов систем электроснабжения самолетов, вертолетов и крылатых ракет: силовых приводов систем управления, генераторов, циклоконверторов и др. [3]. По ее данным, отсутствие каких-либо средств защиты может привести к возникновению в указанных элементах бросков напряжения и тока до нескольких десятков киловольт и килоампер при длительности в несколько микросекунд и, вследствие этого, к серьезному повреждению систем.

Влияние грозы на электрические установки можно определить двумя параметрами: значением пикового тока (приблизительно 250 кА) и максимальной скоростью изменения тока (приблизительно 30–100 кА/мкс), влияющей на наведение напряжения (до 200 кВ) в проводящих контурах вокруг канала тока разряда молнии. Электрическая составляющая ЭМИ молнии $E_m \approx 40$ кВ/м, а магнитная составляющая $H_m = 160$ А/м на расстоянии 100 м от молнии. Время нарастания находится в пределах 200–500 нс [4]. Наибольшие значения амплитуд в спектре ЭМИ молнии соответствуют частотам 0,3–20 кГц, а ЭМИ разрядов между облаками (без обратного разряда): 0,1–10 МГц. Из этого следует актуальность прогнозирования (предсказания) и диагностики (измерения параметров) ЭМИ молний в целях ускорения принятия решения по за-

щите от них. Однако не менее актуальным является разработка средств имитации ЭМИ молнии вблизи кабельных линий, например, самолетных жгутов, и их использование на стадиях испытаний оборудования.

ЭМИ ядерных взрывов и «электромагнитной бомбы» («Е-бомбы»)

Наибольшую опасность, как по степени поражения, так и по области активного воздействия, для объектов электрорadiосвязи представляют стратосферные (10–60 км) и ионосферные (60–500 км) ядерные взрывы [5]. Применение электромагнитного оружия высокой мощности в основном ориентируется на высоты до 50 км.

Ключевыми технологиями, применяемыми при создании «электромагнитной бомбы» («Е-бомбы»), являются: генераторы со сжатием магнитного потока при помощи взрывчатки, а также работающие на взрывчатке или пороховом заряде магнитогиродинамические генераторы и целый набор микроволновых устройств высокой мощности [6–8].

Известным видом микроволнового оружия является так называемый взрывной генератор с сжатием магнитного потока («FC-генератор»). В настоящее время удалось довести пиковую мощность «FC-генераторов» до десятков тераватт. Анализ публикаций позволяет выявить типовые параметры ЭМИ «FC-генератора»:

$$E_m \approx 120\pi H_m; H_m = (10^3 - 10^4) \times 160 \text{ А/м}; \\ t_{\text{фр}} \approx 50 \text{ нс.}$$

Другим видом электромагнитного оружия являются микроволновые генераторы с виртуальным катодом — виркаторы. Экспериментально от виркаторов получены мощности от 170 кВт до 40 ГВт в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Американский образец оружия данного класса под условным названием MPS-II использует зеркальную антенну диаметром 3 м. Он развивает импульсную мощность около 1 ГВт (напряжение 265 кВ, ток 3,5 кА). При напряженности поля в несколько киловольт на метр он вызывает напряжение от сотен вольт до киловольт на облученных проводах и кабелях.

Обобщенные параметры СЭМИ, рекомендуемые для имитации:

- ЭМИ молнии: $E_m = 40$ кВ/м; $H_m = 160$ А/м; $t_{\text{фр}} = 0,2 \div 2$ мкс, $t_u = 50$ мкс, $N = 4$;
- ЭМИ ЯВ: $E_m = 500$ кВ/м; $H_m = 8$ кА/м; $t_{\text{фр}} = 5 \div 50$ нс; $t_u = 0,6$ мкс;
- ЭМИ «Е-бомбы» — взрывного генератора («FC-генератора»): $E_m \approx 120\pi H_m$; $H_m = (10^3 - 10^4) \times 160$ А/м; $t_{\text{фр}} \approx 50$ мкс; $t_u = 1$ нс;
- СВЧ ЭМИ «виркаторной Е-бомбы»: $E_m \approx 150$ кВ/м; $H_m = E_m / 120\pi$; $t_{\text{фр}} \approx 1$ нс; $t_u = 5$ нс; N -пачка.

Новый принцип имитации деструктивного воздействия СЭМИ через кабельные линии — принцип «интегрального импульса»

Помимо сложности теоретических исследований в области защиты от СЭМИ специфика проблемы проявляется также и в том, что эти исследования трудно поддаются экспериментальной проверке вследствие высокой стоимости и объемности самого эксперимента. Как частичный выход из этого положения, в исключительных случаях проводится имитационное моделирование СЭМИ с помощью мощных импульсных разрядников, подключенных непосредственно к кабелю. Однако такое подключение не может адекватно и с достаточной точностью повторить кондуктивные импульсные возмущения, возникающие в кабеле при индукционном воздействии реальных СЭМИ.

Для выхода из этой ситуации требуются нетрадиционные принципы соблюдения критериев подобия при имитации реальных СЭМИ с помощью относительно маломощных источников, а также новые схемотехнические и конструкторские решения.

Предлагаемый здесь принцип «интегрального импульса» основан на следующих трех одновременно выполняемых положениях:

1. Имитирующий относительно маломощный (переносной) источник ЭМИ должен воздействовать на кабельный фрагмент электромагнитно-индукционным, волновым или комбинированным (можно дополнительно: отраженно-волновым) способом в соответствии с временными и пространственными критериями подобия для процессов преобразования индукционного ЭМИ ($\vec{E}(t)$; $\vec{H}(t)$) в кондуктивный: $u_u(t)$ или $i_u(t)$.

2. Непосредственное воздействие на электронный объект мощного индуцированного кондуктивного ЭМИ $U_{\text{ЭМИ}}(t)$ $I_{\text{ЭМИ}}(t)$ либо имитируется эквивалентной по суммарной энергии воздействия временной последовательностью из n менее мощных импульсов $u_u(t)$, либо $i_u(t)$ той же формы, причем:

$$W_{\Sigma} = \int_0^{t_{\text{ЭМИ}}} I_{\text{ЭМИ}}(t) \times U_{\text{ЭМИ}}(t) dt = n \times \int_0^{t_u} u_u(t) \times i_u(t) dt.$$

3. Энергия каждого из n имитационных импульсов должна превышать критический уровень начального необратимого разрушения микроструктур исследуемых электронных объектов:

$$\int_0^{t_u} u_u(t) \times i_u(t) dt > W_{\text{крит}}.$$

Кроме того, одна из амплитудных величин импульса $U_{m.u}$ или $I_{m.u}$ должна превышать допустимый уровень соответствующей величины для этих объектов.

В качестве дополнительного примечания можно отметить еще одно положительное свойство такой имитации: при индикации и измерениях ЭМИ в наносекундных и микросекундных диапазонах можно использовать принцип измерения одним компаратором с последовательно-ступенчатым изменением порогового уровня (вместо m параллельных компараторов с различными пороговыми уровнями).

Исходной предпосылкой для указанного принципа имитации СЭМИ служат общеизвестные в механике аналогичные способы эквивалентной замены мощного однократного импульсного воздействия последовательностью из n менее мощных, но необратимо деформирующих или сдвигающих импульсов, например:

- кузнечнаяковка,
- забивание свай и гвоздей,
- вибрационная очистка труб,
- вибрационное антиобледенительное воздействие (в том числе и электромагнитно-механическое) и т. п.

Указанный принцип позволяет создать высокоэффективный переносной испытательный имитатор индукционных СЭМИ в кабельных линиях электротехнических комплексов (с приемлемыми стоимостью и трудоемкостью испытаний).

Методика расчета составляющих ЭМИ в электромагнитно-индукционной камере имитатора

Расчетные схемы концентраторов ЭМИ с фигурным (а) и прямолинейным (б) кабельными фрагментами приведены на рис. 1. Для объединения двух математических моделей геометрические размеры первой схемы

приведены в соответствие со второй. Суммарная ЭДС $N \varepsilon(t)$, индуцируемая в кабельном фрагменте с общей длиной d (N — число витков), имеет в общем случае две составляющие: ЭДС электромагнитной и электрической индукции $\varepsilon_H(t)$ и $\varepsilon_E(t)$, т. е.:

$$N \varepsilon(t) = \varepsilon_E(t) + \varepsilon_H(t).$$

Первая составляющая ЭДС соответствует закону электромагнитной индукции Фарадея:

$$\varepsilon_H(t) = -(d\Phi/dt), \quad (1)$$

а также уравнениям Максвелла, записанным в дифференциальной форме:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

или в интегральной форме:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{s}, \quad \oint \vec{E} d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s}, \quad (3)$$

где $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$, $\vec{j} = v(\vec{E} + \vec{E}_{\text{стоп}})$ — плотность тока проводимости, $\partial \vec{D} / \partial t$ — плотность тока смещения, v — удельная проводимость.

Согласно вышеприведенным уравнениям

$$\begin{aligned} \varepsilon_H(t) &= -\oint \mu \mu_0 \frac{N}{l_0} dl \times \iint_S \vec{H} d\vec{s} = \\ &= -\mu_0 \mu \frac{N}{l_0} s_{\mu} \frac{d}{dt} \oint \vec{H} d\vec{l} = \\ &= -\mu_0 \mu \frac{N}{l_0} s_{\mu} \frac{d}{dt} (N_j J(t) + S \varepsilon_0 \varepsilon E(t)), \quad (4) \end{aligned}$$

где $E(t) = e(t)/t$ — напряженность квазиоднородного электрического поля в зоне концентратора, $e(t)$ и $J(t)$ — напряжение и ток импульсных генераторов (ГИН и ГИТ).

Вторая составляющая ЭДС соответствует закону Гаусса для электрического поля у поверхности проводника

$$E\sigma = \sigma/\varepsilon_0 \varepsilon, \quad (5)$$

что в интегральной форме, с учетом двух последовательно включенных проходных цилиндрических конденсаторов с емкостями 2С (рис. 1), определяет индуцируемую ЭДС, приближенно равную падению напряжения на кабельном фрагменте с параметрами L , r :

$$\varepsilon_E(t) \approx L(di/dt) + r \times i, \quad (6)$$

где $i(t)$ определяется дифференциальным уравнением второго порядка

$$CL(d^2i/dt^2) + rC(di/dt) + i = C \times e(t).$$

Для коротких импульсов приближенно можно с достаточно высокой точностью принять:

$$\varepsilon_E(t) = K_E \times e(t), \quad (7)$$

где $K_E = C/C_d$, $C_d = \varepsilon_0 \varepsilon S/l$.

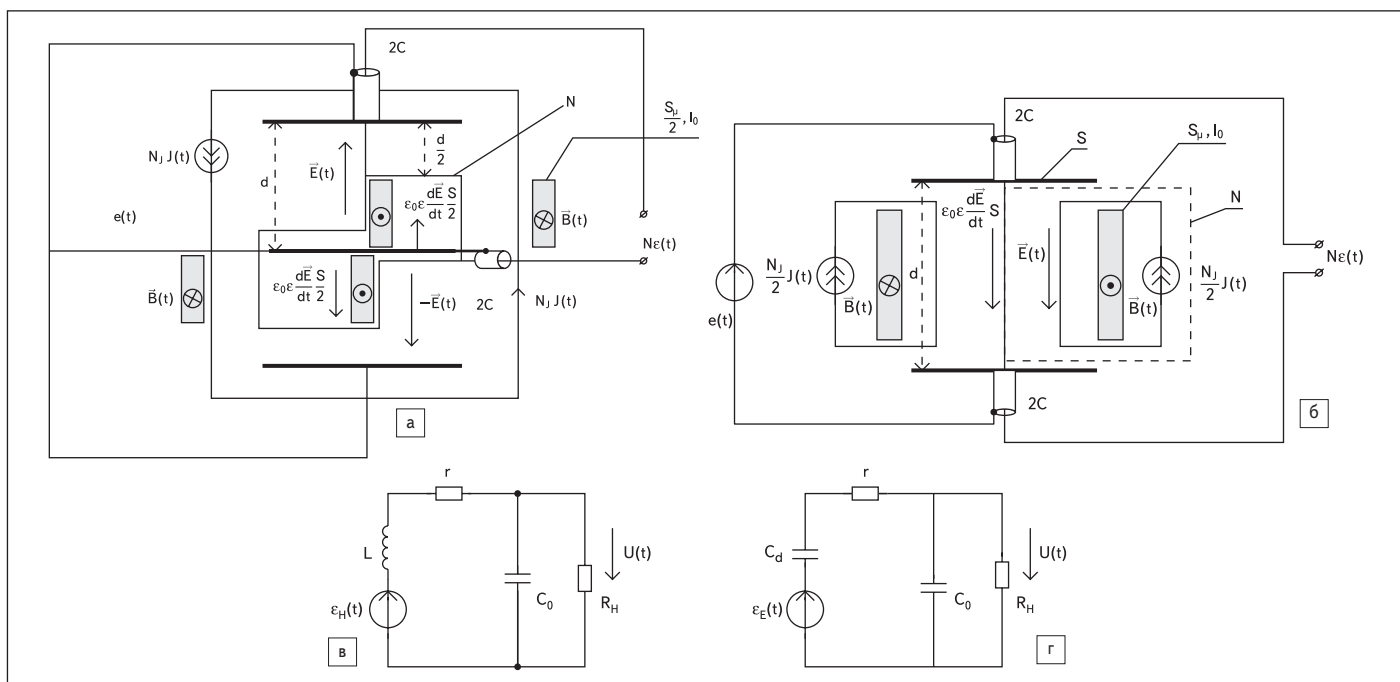


Рис. 1. Расчетные схемы концентраторов СЭМИ: а) с фигурным кабельным фрагментом; б) разъемного, с прямолинейным кабельным фрагментом; в, г) эквивалентные электрические схемы кабельного фрагмента при активно-емкостной нагрузке

Представляется возможным анализировать передаточные функции кабельного фрагмента отдельно для каждой из составляющих ЭДС. На рис. 1в, г показаны эквивалентные электрические схемы кабельного фрагмента при активно-емкостной нагрузке $R_H - C_0$ для составляющих $\varepsilon_H(t)$ и $\varepsilon_E(t)$.

На рис. 2а представлены ЛАХ $L[W] = 20 \lg(W(j\omega))$ для различных

$$\gamma = \frac{L + rC_0R_H}{2\sqrt{LC_0R_H}(r + R_H)} \quad [9].$$

На рис. 2б представлены ЛАХ $L[W] = 20 \lg(W(j\omega))$ при фиксированных K и T для различных

$$\beta = \frac{C_dR_H + C_d r + C_0R_H}{2\sqrt{C_0C_dR_Hr}} > 1 \quad [9]. \blacksquare$$

Литература

- Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Электротехническая совместимость электрооборудования автономных систем / Под ред. В. П. Булекова. М.: Энергоатомиздат, 1995.
- Булеков В. П., Резников С. Б., Болдырев В. Г. и др. Электротехническая совместимость оборудования ЛА / Под ред. В. П. Булекова. М.: Издательство МАИ, 1992.
- Брускин Д. Э., Зубакин С. Н. Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием // Итоги науки и техники. Сер. Электрооборудование транспорта. Т. 6. М.: ВИНТИ, 1986.
- Meppelink J. Elektromagnetische Verträglichkeit Elektrischer Einrichtungen, Elektronik (BRD), 1983.
- Мырова Л. О., Попов В. Д., Верхотусов В. И. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений. М.: Радио и связь, 1993.
- Kopp C. The E-bomb-a Weapon of Electronical Mass Destruction. Information Warfare: Thunder's month press. New York, 1996.
- Fulghum D. A. Microwave Weapons Await a Future War. Aviation Week and Space Technology, 1999.
- Neoberling R. F., Fazio M. V. Advances in Virtual Cathode Microwave Sources // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 34. № 3. August, 1992.
- Панин В. В. Лабораторный практикум «Методы и средства измерения параметров импульсных электромагнитных процессов». М.: МИФИ, 1987.

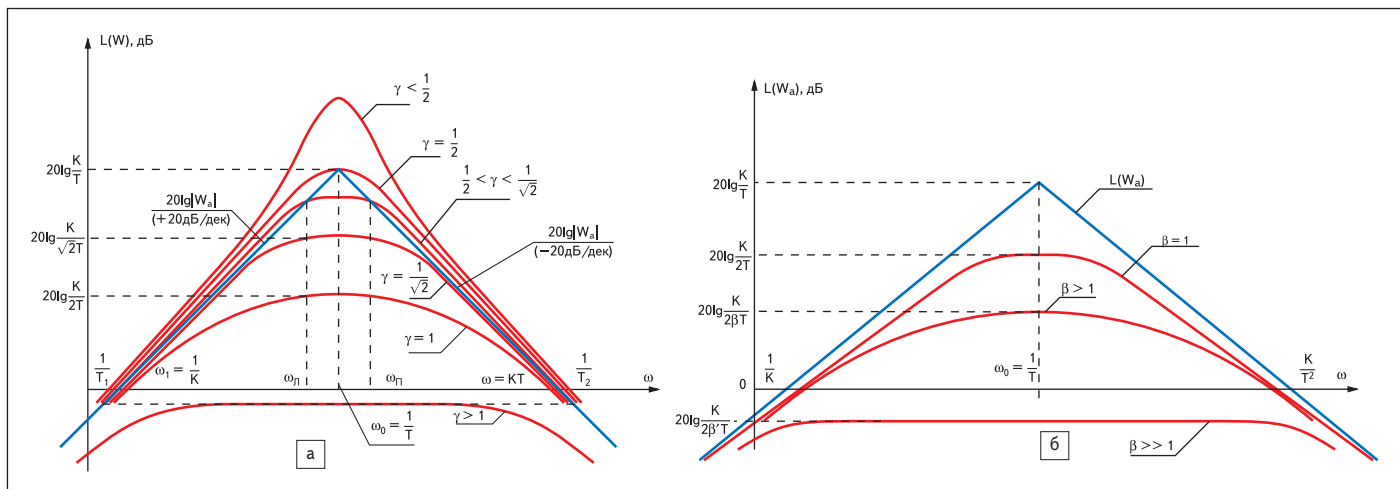


Рис. 2. ЛАХ кабельного фрагмента для электромагнитной (а) и электрической (б) составляющих