

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.391.82; 621.391.825

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ УЯЗВИМОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МЕТОДОМ УДАРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2024 г. В. Е. Осташев*, А. В. Ульянов

Объединенный институт высоких температур РАН,
Ижорская ул., 13, стр. 2, Москва, 125412 Российская Федерация

*E-mail: ostashev@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 09.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Рассмотрена проблема обеспечения работоспособности электронных технических средств (ЭТС) при воздействии мощного электромагнитного излучения, в частности, рассмотрен механизм отклика ЭТС на внеполосное воздействие излучения. Указаны параметры излучений, характеризующие уровень их воздействия на ЭТС. Предложена методика эмпирической оценки пороговых значений этих параметров, которые характеризуют стойкость ЭТС к воздействию сверхширокополосного излучения.

Ключевые слова: сверхширокополосное излучение, электронные устройства, стойкость к воздействию излучения, уровень воздействия

DOI: 10.31857/S0033849424050115, **EDN:** IKYWJI

ВВЕДЕНИЕ

В связи с общей тенденцией развития технических устройств в направлении насыщения их электронными системами, а также достижений в области создания сильноточных быстродействующих электронных приборов большой мощности обсуждаются проблемы, связанные с угрозой воздействия мощных электромагнитных (ЭМ) излучений радиочастотного диапазона на электронные технические средства (ЭТС) [1–17]. Существование этой угрозы и ее актуальность *de facto* подтверждены в стандарте РФ ГОСТ Р 51317.2.5–2000 “Совместимость технических средств электромагнитная” и в стандарте США MIL-STD-464C “Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems” [18, 19].

Угроза мощных радиочастотных излучений заключается в том, что их воздействие может вызвать отказ режима нормального качества функционирования ЭТС как на время воздействия излучения (подавление функционала ЭТС), так и после его воздействия (поражение обратимое и необратимое). Свойство ЭТС сохранять работоспособность, т.е. сохранять нормальное качество функционирования (КФ) в условиях внешнего воздействия, называется стойкостью по отношению к этому воздействию [20]. Если угроза ЭМ-атаки реальна [1], то широкое внедрение ЭТС в различные сферы деятельности общества становится оправданным при условии, что стойкость режима нормального КФ ЭТС может быть обеспечена на необходимом уровне.

Изучению причин и условий отказа режима нормального КФ ЭТС в результате воздействия мощных импульсных электромагнитных излучений посвящено много исследований. Общим для них является следующее:

- уровень воздействия характеризуется тем параметром излучения, который регистрировался непосредственно, а именно: плотностью потока ЭМ энергии S (Вт/м²) в случае сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения и напряженностью электрического поля E (В/м) в случае сверхширокополосного излучения (СШПИ);
- в стандарте США [19] уровень воздействия широкополосного излучения оценивается значением плотности частотного спектра, q (В/м/Гц);
- стойкость ЭТС ставится в однозначное соответствие конкретному сигналу внешнего воздействия;
- значение регистрируемого параметра излучения, при котором осуществляется угроза воздействия, имеет пороговый характер;
- пороговое значение регистрируемого параметра частотно-импульсного излучения зависит от амплитудно-временной формы сигнала, может изменяться при изменении частоты следования импульсов f_0 , а также от пространственной ориентации ЭТС в поле излучения.

Из приведенных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Число параметров, характеризующих стойкость ЭТС, соответствует числу первичных

параметров излучения — это амплитуда сигнала, его частотный спектр, частота следования импульсов, а также ориентация ЭТС в поле излучения.

2. Уровень воздействия СВЧ- и СШП-сигналов фактически характеризовался одним параметром, поскольку $S \sim E^2$.

3. Стойкость ЭТС поставлена в соответствие конкретному ЭМ-сигналу. Достоверность такого результата безусловна, но он ничтожен, поскольку прогноз стойкости ЭТС к произвольному сигналу невозможен.

4. Параметров, характеризующих излучение, много, одинаковых ЭТС нет. Из этого следует, что число варьируемых параметров задачи при определении стойкости ЭТС к воздействию излучения необходимо уменьшать.

5. Стойкость есть отражение внутренних свойств ЭТС, которые проявляются при возбуждении его электрических структур ЭМ-полем излучения. Подобие этих свойств может быть одним из критериев классификации ЭТС.

Рассмотрим, как формируется отклик структур ЭТС на внешнее ЭМ-воздействие.

Механизм воздействия ЭМ-излучения на ЭТС. Обсудим этот вопрос, следуя аналогии. ЭТС является “приемником” излучения, даже когда нет антенных трактов. Приемник поглощает ЭМ-энергию в частотном спектре его чувствительности (или уязвимости). Уровень внешнего сигнала в этом спектре определяет качество приема сигнала (или уровень ЭМ-возбуждения структур ЭТС). Нормальное качество приема может быть обеспечено только в ограниченном интервале амплитуд параметров входного сигнала (мощность, плотность частотного спектра). Выход за пределы этого интервала приводит к утрате нормального КФ ЭТС. Последствия превышения значений параметров стойкости ЭТС к воздействию излучению могут быть обратимыми или необратимыми.

Из приведенной аналогии следует: чтобы вызвать нарушение режима нормального функционирования ЭТС, воздействуя на его структуры ЭМ-излучением, необходимо доставить определенную энергию в частотную область уязвимости ЭТС со скоростью доставки этой энергии (мощностью) выше порогового значения. Поразить функционал ЭТС, воздействуя на него вне частотной области уязвимости, можно, но такой процесс энергетически не эффективен.

При воздействии квазистационарного СВЧ-излучения приоритетом является преодоление порога по мощности воздействия. Его энергия определяется длительностью импульса. При воздействии мощного импульса СШПИ, длительность которого ограничена, приоритетом является преодоление порога по энергии импульса, а поскольку частотный спектр сверхширокополосный, — то энергии

в единичном частотном интервале. Приведенное сравнение СВЧ- и СШП-сигналов показывает, что уровень ЭМ-воздействия на структуры ЭТС может характеризоваться разными параметрами этих излучений.

Поразить функционал ЭТС может один импульс излучения или последовательность импульсов. В первом случае пороговые уровни воздействия преодолеваются сразу и по мощности, и по энергии сигнала. Во втором случае отказ функционирования ЭТС происходит по истечении некоторого времени непрерывного накопления энергии ЭМ-возмущений. В этом “квазистационарном” процессе осуществляется непрерывный подвод ЭМ-энергии, ее распределение по структурам ЭТС, затухание этой энергии с некоторой скоростью (мощностью) вследствие омических потерь в элементах структуры, а также обратного излучения. Чем больше различие в скорости подвода и диссипации энергии, тем с большей скоростью энергия ЭМ-возмущений накапливается в структурах ЭТС. Это создает условия для нарушения режима работы активных элементов ЭТС, возникновения функциональных сбоев в работе подсистем, увеличения скорости их появления и, в конечном счете, ведет к отказу режима нормального функционирования ЭТС [21].

Цель данной работы — по факту потери нормального КФ ЭТС в результате воздействия излучения предложить и обосновать эмпирический метод оценки положения частотной области уязвимости ЭТС, а применительно к СШПИ оценить пороговое значение уровня его воздействия.

1. ПАРАМЕТРЫ СТОЙКОСТИ ЭТС

1.1. Частотная область уязвимости ЭТС и ее обнаружение

Электромагнитное поле излучения может инициировать в структурах ЭТС собственные (резонансные) колебания токов и напряжений или вынужденные колебания на частотах, далеких от резонансных. Поглощение ЭМ-энергии в этих структурах наиболее эффективно на резонансных частотах. Они являются центрами частотных областей уязвимости ЭТС.

Возбуждение резонансных колебаний в структурах ЭТС может быть инициировано ударным воздействием импульсов СШПИ. По отношению к этому излучению реальные ЭТС являются частотно-избирательными или узкополосными “приемниками”. В результате ударного воздействия в структурах ЭТС происходит возбуждение резонансных колебаний тока и напряжения, интерференция этих колебаний, их усиление при участии источников электропитания ЭТС и затухание вследствие обратного излучения и диссипации энергии возбуждения в элементах электронной

схемы. Таким образом, СШПИ может быть использовано как средство активации частотной области уязвимости ЭТС. (Метод обнаружения этой области описан далее, в разд. 3.)

1.2. Параметры, характеризующие уровень ЭМ-воздействия на ЭТС

Энергия излучения доставляется к ЭТС в физическом и частотном пространстве. Нет проблемы прицеливания в ЭТС в физическом пространстве. Прицеливание в частотном пространстве заключается в том, чтобы обеспечить пересечение частотных спектров воздействующего сигнала и уязвимости ЭТС. При этом каждая из спектральных областей по отношению к другой может быть широкой или узкой. В зависимости от этого отклик структур ЭТС на ЭМ-воздействие будет разным.

Если спектр сигнала относительно узкий (например, СВЧ-сигнал), то уровень его воздействия на ЭТС определяется параметром $E(t)$ или $S(t)$ ($S \sim E^2$) [22]. Если спектр сигнала широкий (СШП-сигнал), то уровень его воздействия определяется плотностью частотного спектра $q(F)$ (В/м/Гц) в той точке на оси частот, которая соответствует центральной частоте спектра уязвимости ЭТС. В первом случае к ЭТС доставляется полная энергия падающего СВЧ-сигнала. Вероятность попадания этого сигнала в частотную область уязвимости ЭТС мала, поэтому в структурах ЭТС возбуждаются вынужденные колебания напряжения и тока. Их длительность равна длительности воздействия. Во втором случае в структурах ЭТС возбуждаются относительно продолжительные резонансные колебания. При этом в частотную область уязвимости ЭТС доставляется только доля энергии сигнала, которая пропорциональна ширине этой области. Характерные значения параметров E , q и длительность импульса τ связаны зависимостью $q \approx E\tau$, поэтому фиксированный уровень воздействия СШПИ на ЭТС достигается при разных сочетаниях значений E и τ .

Произведение $cq(F)$, где c — скорость распространения ЭМ-волны, имеет размерность электрического напряжения. Локальный параметр $U_{\text{ЭМ}} = cq(F)$ можно было бы назвать эффективным напряжением ЭМ-воздействия импульса СШПИ на частоте F . Если в соответствии с [19] принять в качестве характерного значения стойкости ЭТС, что $q \approx 1$ В/м/МГц, то $U_{\text{ЭМ}} \approx 0.3$ кВ.

1.3. Параметры, характеризующие стойкость ЭТС к излучению

Результат воздействия излучения на ЭТС зависит от значения параметров излучения в частотном спектре поглощения энергии структурами ЭТС, от пространственной ориентации ЭТС в поле излучения заданного направления и поляризации. Когда достигнуто пересечение спектров излучения

и уязвимости ЭТС, то воздействие эффективно. При этом значение параметров стойкости ЭТС к этому воздействию минимально.

Каждому пространственному положению ЭТС в общем случае соответствует свой минимум уровня стойкости. Семейство этих значений имеет абсолютный минимум и абсолютный максимум. Сравнение параметров, характеризующих уровень воздействия излучения, с параметрами, характеризующими минимальную и максимальную стойкость ЭТС, позволяет определить границы дистанции поражения функционала ЭТС, удаленного от источника воздействия. При этом разработчик средств ЭМ-поражения должен ориентироваться на максимальный уровень стойкости заданной ему выборки ЭТС.

Процессы, инициированные воздействием излучения на структуры ЭТС, в общем случае индивидуальны. Поэтому достоверный результат испытаний ЭТС на стойкость к ЭМ-излучению может быть получен только эмпирическим методом.

2. ПАРАМЕТРЫ СШП-ИЗЛУЧЕНИЯ АПЕРТУРНОГО РАСКРЫВА

Для обсуждения возможности использования СШПИ как средства тестирования стойкости ЭТС рассмотрим некоторые особенности этого излучения при его формировании антенной апертурного типа.

Пусть размер апертуры регулярного ТЕМ-рупора равен 0.3×0.3 м, угол раскрыва электродов 20° , длительность фронта переходной характеристики — 40 пс. Расчет параметров излучения рупора проведем с использованием модели излучения плоского апертурного раскрыва, возбуждаемого неоднородно и не синхронно [23, 24].

Пусть электрический импульс возбуждения рупора $U(t)$ имеет вид моноцикла (рис. 1). При этом импульс напряженности электрического поля излучения $E(t)$ в его дальней зоне и по оси диаграммы направленности (ДН) антенны имеет вид, представленный на рис. 2.

На рис. 3 показано распределение плотности частотного спектра $q(F)$ импульса излучения при возбуждении рупора импульсом моноцикла $U(t)$ с фиксированной амплитудой, но при разной длительности фронта перепада напряжения — 100, 150 и 300 пс.

В табл. 1 приведены относительные значения параметров импульса излучения по оси антенны в дальней зоне излучения при $R = \text{const}$. Сравнение этих данных показывает, что параметры E и q являются характеристикой уровня воздействия качественно разных излучений. Действительно, при изменении τ изменяются значения E_{max} и энергии

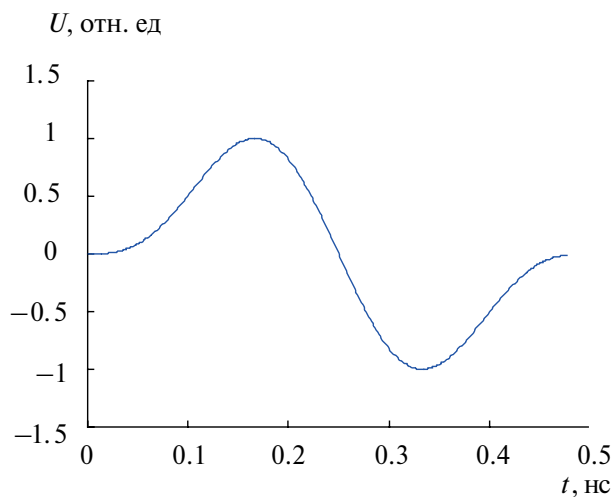


Рис. 1. Напряжение возбуждения *ТЕМ*-рупура.

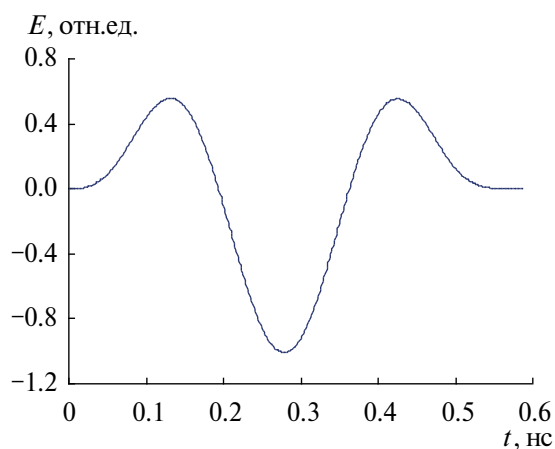


Рис. 2. Напряженность электрического поля импульса излучения.

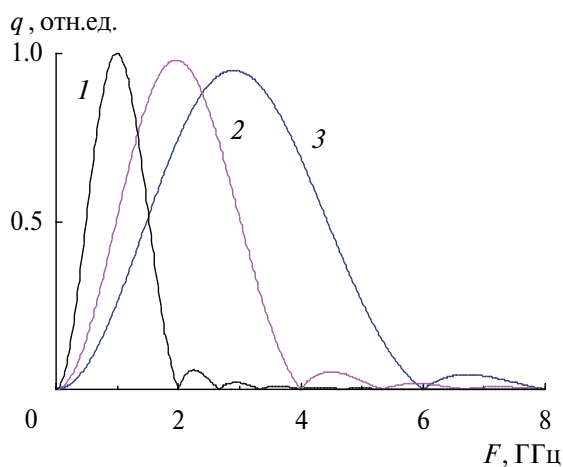


Рис. 3. Плотность частотного спектра импульса излучения при фронте перепада напряжения $U(t) = 300$ (1), 150 (2) и 100 пс (3).

Таблица 1. Относительные значения параметров излучения заданного апертурного раскрытия при вариации длительности фронта импульса его возбуждения

Параметр, отн.ед.	Фронт, пс		
	100	150	300
$E_{\max}$	1	0.66	0.33
W	1	0.72	0.37
$q_{\max}$	1	1.03	1.05

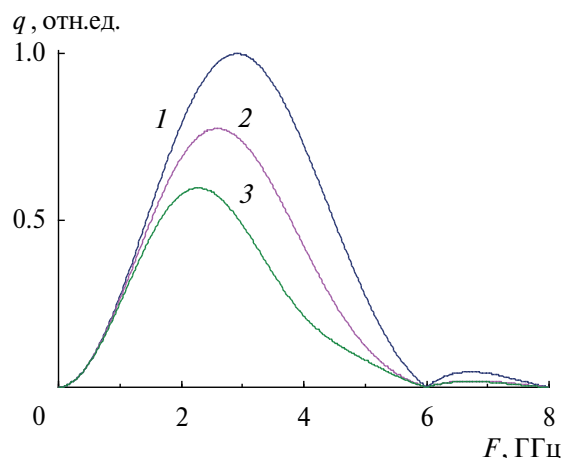


Рис. 4. Плотность частотного спектра импульса СШПИ при $\varphi = 0$ (1), 8 (2) и 12 град (3).

импульса W , а значение параметра $q_{\max}$ практически не изменяется ($q_{\max} \approx \tau E_{\max} \approx \text{const}$).

На рис. 4 показано распределение плотности частотного спектра $q(F, \varphi)$ импульса СШПИ, наблюдаемого под углом φ по отношению к оси ДН антенны на фиксированном от нее расстоянии. При увеличении φ происходит уменьшение амплитуды $q(F, \varphi)$ и смещение спадающей ветви распределения в низкочастотную область спектра. Нули распределений остаются на тех же частотах. Положение восходящей ветви распределения практически не изменяется.

3. ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СТОЙКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СШП-ИЗЛУЧЕНИЯ

Последовательность СШП-импульсов при частоте их следования f_0 имеет сплошной частотный спектр, по форме подобный спектру единичного импульса, если уширение линий спектра, вызванное нестабильностью Δf_0 , превышает частотный интервал f_0 . При скважности последовательности импульсов g_0 это условие выражается соотношением

$$g_0 \Delta f_0 / f_0 \geq 1. \quad (1)$$

Источники мощных СШПИ этому условию удовлетворяют, поскольку $g_0 \approx 10^6 - 10^7$ при $f_0 \sim 10^3$ имп/с.

Рассмотрим способ определения пороговых значений параметров, характеризующих стойкость ЭТС при частотно-импульсном воздействии СШПИ, формируемого антенной апертурного типа.

Пусть ЭТС располагается по оси ДН антенны излучателя ($\varphi = 0$). Пусть при фиксированной частоте f_0 на расстоянии R_n от излучателя наблюдается отказ нормального функционирования ЭТС в соответствии с заданным критерием результата воздействия (подавление, поражение). Это означает, что в какой-то точке на распределении плотности частотного спектра единичного импульса излучения $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$ достигнуто пороговое значение параметров воздействия. Назовем эту точку (q_n, F_n) критической, а распределение q_1 представим в виде кусочно-ломаной линии l ($0bcd$ на рис. 5). Рассмотрим способ определения положения точки (q_n, F_n) на зависимости $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$.

1. Не изменяя R ($R = R_n$), отклоним ось ДН антенны на угол φ от направления на ЭТС (фиксированные параметры задачи далее не указываем). В соответствии с рис. 4 амплитуда распределения $q_1(F, |\varphi| > 0)$ уменьшится (линия 2 $0aa'd$ на рис. 5), восходящая ветвь спектрального распределения не изменится на отрезке $[0, a]$, а нисходящая, $[a', d]$, сместится в низкочастотную область.

Если при повороте ДН на угол φ результат воздействия излучения на ЭТС остался прежним (отказ функционирования), то критическая точка (q_n, F_n) находится где-то на отрезке $[0, a]$ распределения $q_1(F, \varphi = 0)$. Чтобы найти положение этой точки, следует последовательно увеличивать φ и, соответственно, уменьшать длину отрезка $[0, a]$ до тех пор, пока не будет восстановлен нормальный режим работы ЭТС. При этом проекция точки a на координатные оси q и F дает пороговые значения параметров q_n и F_n . Точка F_n характеризует

центральную частоту спектральной области уязвимости ЭТС. Точка q_n является пороговым значением плотности спектра импульса излучения в точке F_n при частоте следования импульсов излучения f_0 .

2. Представим обратное. Пусть при переходе от распределения $q_1(F, \varphi = 0)$ к $q_1(F, |\varphi| > 0)$ КФ ЭТС вернулось к нормальному состоянию. Это означает, что критическая точка (q_n, F_n) находится где-то на ветви bcd распределения $q_1(F, \varphi = 0)$.

Если точка (q_n, F_n) находится на отрезке $[b, c]$, то ее положение может быть найдено при вариации φ и увеличении амплитуды распределения q_1 при уменьшении R от значения R_n ($R < R_n$) (линия $2'$ на рис. 5). Так, например, при фиксированном значении φ и вариации R точка ξ пересечения спектральных распределений $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$ и $q_1(F, R < R_n, \varphi)$ перемещается по отрезку $[b, c]$ в пределах $[b', c]$. Длина отрезка $[b', c]$ варьируется при изменении φ , так как при этом изменяется положение точки a' на частотной оси (см. рис. 4).

Таким образом, положение критической точки (q_n, F_n) на ветви $[b, c]$ распределения $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$ определяется при вариации параметров φ и R .

3. Если точка (q_n, F_n) находится на отрезке $[c, d]$ распределения $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$, то ее положение определяется при использовании излучателя с более высокочастотной границей спектра излучения.

На рис. 6 представлено распределение $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$ (линия l), при котором КФ ЭТС не является нормальным, и распределение $q_2(F, R, \varphi = 0)$ с высокочастотной границей спектра $d' > d$. Амплитуду распределения $q_2(F, R, \varphi = 0)$ необходимо согласовать с амплитудой $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$, подобрав значение R . Пусть линия 2 соответствует распределению $q_2(F, R_2, \varphi = 0)$, а линия $2'$ — распределению $q_2(F, R > R_2, \varphi = 0)$. При вариации R происходит перемещение точки ξ пересечения распределений $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$ и $q_2(F, R, \varphi = 0)$. При этом по факту потери КФ ЭТС фиксируются параметры критической точки (q_n, F_n) .

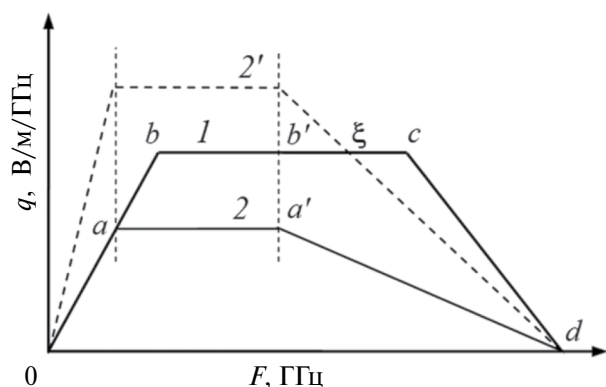


Рис. 5. Упрощенное представление частотного спектра импульса СШПИ в точке наблюдения: 1 — $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$; 2 — $q_1(F, R_n, |\varphi| > 0)$; 2' — $q_1(F, R < R_n, |\varphi| > 0)$.

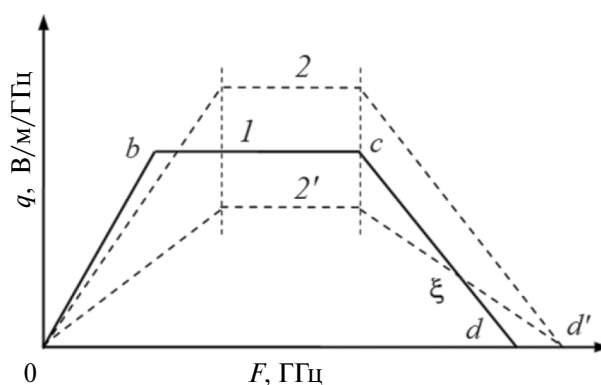


Рис. 6. Упрощенное представление частотного спектра импульса СШПИ в точке наблюдения: 1 — $q_1(F, R_n, \varphi = 0)$; 2 — $q_2(F, R_2, \varphi = 0)$; 2' — $q_2(F, R > R_2, \varphi = 0)$.

4. При изменении частоты следования импульсов f_0 распределение плотности частотного спектра СШПИ, падающего на ЭТС, не изменится, если не нарушено условие (1). Параметры частотной области уязвимости ЭТС характеризуют свойства его структуры, поэтому сохраняются при изменении частоты f_0 . Если эти утверждения верны, то при переходе от f_0 к f_1 значение дистанции поражения $R_n(f_0)$ может измениться до $R_n(f_1)$. При этом пороговое значение плотности частотного спектра, характеризующее стойкость ЭТС при частоте f_1 , будет равно

$$q_n(f_1) = q_n(f_0)[R_n(f_0)/R_n(f_1)]. \quad (2)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Любая ЭТС детерминирована в физическом и в частотном пространстве. Вероятность ЭМ подавления/поражения функционала ЭТС увеличивается с увеличением точности прицеливания в обоих пространствах.

2. Параметры частотной области уязвимости ЭТС характеризуют свойство его структуры. Эта область может быть выявлена при ударном возбуждении ЭТС импульсами СШПИ при использовании свойства апертурной антенны изменять форму распределения плотности частотного спектра излучения при отклонении точки наблюдения параметров излучения от оси ДН антенны.

3. Уровень воздействия импульса СШПИ на частотно-избирательную систему характеризуется плотностью частотного спектра импульса. Один уровень СШП-воздействия достигается при разных сочетаниях значений напряженности поля излучения и длительности импульса ($E\tau \approx \text{const}$).

4. Координаты критической точки параметров (q_n, F_n), характеризующих стойкость ЭТС к воздействию СШПИ, могут быть определены при вариации амплитуды и формы распределения плотности частотного спектра излучения.

5. Пороговое значение параметра q_n соответствует определенному критерию результата воздействия (подавление, поражение функционала ЭТС) и может зависеть от частоты следования импульсов.

6. Параметры F_n и q_n задают координату прицеливания в ЭТС в частотной области и позволяют оценить предельную дальность R^* подавления/поражения функционала ЭТС при воздействии СШПИ:

$$R^* = q(F_n, R, \varphi = 0) R / q_n(F_n, f_0). \quad (3)$$

Здесь произведение $q(F_n, R, \varphi = 0) R$ есть спектральный потенциал источника СШПИ на частоте F_n [24]; размерность этого потенциала В/Гц.

7. При формировании выборки ЭТС по признаку подобия необходимо отобрать ЭТС по близким параметрам частотной области уязвимости, а затем ранжировать их по уровню стойкости к воздействию заданного сигнала. Гарантированная дальность поражения функционала заданной выборки ЭТС определяется максимальным уровнем стойкости выборки.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Объединенного института высоких температур РАН на 2024 год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Foster J.S., Jr., Gjeldre E., Graham W.R. et al. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Critical National Infrastructures. Bernan, 2008. 218 p. http://www.empcommission.org/docs/A2473-EMP_Commission-7MB.pdf
2. Camp M., Garbe H., Nitsch D. // IEEE Intern. Symp. on EMC. Minneapolis. 19–23 Aug. 2002. N.Y.: IEEE, 2002. P. 87.
3. Вдовин В.А., Кулагин В.В., Черепенин В.А. // Электромагнитные волны и электрон. системы. 2003. Т. 8. № 1. С. 64.
4. Bäckström M.G., Löfstrand K.G. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 396.
5. Nitsch D., Camp M., Sabath F. et al. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 380.
6. Тяпин М.С., Мырова Л.О. // Информ. и телеком. технологии. 2006. № 2. С. 20.
7. Baum C.E. // IEEE Trans. 2007. V. EMC-49. № 2. P. 211.
8. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. М.: Вузовская книга, 2007.
9. Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Коровченко И.С. и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11. № 3. С. 60.
10. Симакин С.В., Ларионенко А.В. // Технологии ЭМС. 2009. № 3. С. 23.
11. Hwang S.M., Hong J.I., Han S.-M. // J. Electromagn. Waves Appl. 2010. V. 24. № 8. P. 1059.
12. Добыкин В.Д. // РЭ. 2011. Т. 56. № 2. С. 236.
13. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. // Журн. радиоэлектроники (электрон. журн.). 2013. № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/yan13/18/text.pdf>

14. Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. М.: Радиотехника, 2017.
15. Здухов Л.Н., Парфенов Ю.В., Тарасов О.А., Ченелев В.М. // Технологии ЭМС. 2018. № 2. С. 22.
16. Toan N.V., Tung D.M., So J., Lee J.-G. // Adv. Electrical and Computer Engineering. 2019. V. 19. № 2. P. 37.
17. Осташев В.Е., Ульянов А.В. // Журн. радиоэлектроники (электрон. журн.). 2019. № 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/13/text.pdf>
18. ГОСТ Р 51317.2.5–2000. “Совместимость технических средств электромагнитная”. М.: Изд-во стандартов, 2001.
19. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. Department of defense interface standard MIL-STD-464C. Washington, 2010. 165 p. <https://www.ema3d.com/wp-content/uploads/downloads/MIL-STD-464C.pdf>
20. ГОСТ 26883–86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2008.
21. Осташев В.Е., Ульянов А.В. // Технологии ЭМС. 2018. № 4. С. 57.
22. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 1983.
23. Осташев В.Е., Ульянов А.В., Федоров В.М. // РЭ. 2020. Т. 65. № 3. С. 234.
24. Осташев В.Е., Ульянов А.В. // РЭ. 2021. Т. 66. № 11. С. 1.

EMPIRICAL ESTIMATION OF THE FREQUENCY'S DOMAIN OF SUSCEPTIBILITY OF ELECTRONIC DEVICES BY THE METHOD OF THE STRIKING ELECTROMAGNETIC INFLUENCE

V. E. Ostashev*, A. V. Ulyanov

*Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Scientist
Izhorskaya str., 13, building 2, Moscow, 125412 Russian Federation*

**E-mail: ostashev@ihed.ras.ru*

Received June 27, 2023; revised August 9, 2023; accepted August 28, 2023

Problem of immunity of the electronic devices under powerful electromagnetic emission as well as mechanism of device response at out-of-band emission influence are discussed. Parameters which characterize level of emission influence on device are indicated. The method of the empirical estimation of threshold level of these parameters, which characterize immunity of device under the influence of ultra-wideband (UWB) emission is proposed.

Keywords: UWB radiation, electronic device, immunity under emission influence, level of emission influence