

УДК 621.391.82; 621.391.825

## ПАРАМЕТРЫ УГРОЗЫ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Е. Осташев, А. В. Ульянов

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13-2

Статья поступила в редакцию 7 июня 2018 г, после доработки – 25 февраля 2019 г.

**Аннотация.** Рассмотрена зависимость уровня угрозы частотно-импульсного воздействия излучения от частоты следования импульсов. Показано, что последовательность импульсов, инициируемых в контуре воздействием импульсов напряжения, может быть «редкой», «плотной» или умеренно «плотной». Установившаяся амплитуда тока зависит от частоты следования импульсов его возбуждения только в случае умеренно «плотной» последовательности инициируемых импульсов. Дана оценка длительности периодического импульсного воздействия до момента достижения максимальной амплитуды индуцированного тока. Представлены энергетические параметры частотно-импульсного сверхширокополосного излучения, характеризующие уровень угрозы его воздействия на относительно узкополосный «приемник» излучения в зависимости от типа последовательности импульсов, инициированных излучением в электропроводящих структурах «приемника».

**Ключевые слова:** угроза электромагнитного воздействия, излучение, частотно-импульсная последовательность.

**Abstract.** The dependence of the threat level of the frequency-pulsed impact of radiation on the pulse repetition rate is considered. It is shown that the sequence of pulses which is initiated in the circuit by the action of voltage pulses can be "rare", "dense" or moderately "dense". The formed amplitude of the current depends on the pulse repetition rate only in the case if the sequence of initiated pulses is moderately "dense". The estimation of duration of periodic pulsed impact, until induced current comes to maximum amplitude, is given. The energy parameters of frequency-pulsed

UWB radiation, which characterize the level of the threat of impact on relatively narrow-band "receiver" of radiation depending on type of pulse sequence excited by radiation in electrical structures of "receiver», are presented.

**Key words:** threat of electromagnetic impact, radiation, frequency-pulse sequence.

## Введение

С появлением быстродействующих устройств коммутации электрического тока стало возможным создание мощных источников радиочастотных излучений. Такие излучения могут быть угрозой нормального функционирования современных устройств, управляемых электронными системами [1-3].

Воздействующие импульсы излучения могут быть единичными, следовать относительно редко или относительно часто. В экспериментах по исследованию стойкости режимов нормального функционирования электронных технических средств (ЭТС) отмечается, что пороговые значения параметра, характеризующего уровень угрозы воздействия излучения, зависят от частоты  $f_0$  следования импульсов [2, 4].

Например, в [2] отмечается, что при переходе от единичного СВЧ импульса к пачке тех же импульсов уменьшение пороговых значений плотности потока энергии излучения (ППЭ, Вт/м<sup>2</sup>) может составлять 20...40%. В стандарте США MIL-STD-464C утверждается, что порог угрозы воздействия импульсного излучения может быть снижен до 15 раз при увеличении частоты  $f_0$  от 100 до 1000 имп/с [4].

При недостатке исходных данных о постановке упомянутых исследований нельзя утверждать, что частота  $f_0$  является независимым параметром, а также что ее увеличение от любого значения обязательно сопряжено с увеличением уровня угрозы воздействия излучения.

Обсудим эти вопросы, опираясь на ограниченные эмпирические факты и некоторые предположения.

## 1. Элементарная модель объекта электромагнитного воздействия

Предположительно механизм реализации угрозы воздействия излучения на ЭТС может быть описан следующим образом.

Поле излучения возбуждает переменный электрический ток в элементах конструкции и электропроводящих структурах ЭТС. Время существования этого тока определяется не только длительностью импульсов возбуждения, но и временем затухания тока, его релаксацией. Ток проникает на внутренние поверхности защищенных объемов через стыки и щели в конструкциях и электромагнитных (ЭМ) экранах. Стыки и щели являются щелевыми антеннами, которые возбуждаются поверхностными токами, инициированными внешним излучением. Излучение стыков и щелей, а также поверхностные электрические токи формируют ЭМ обстановку (поля) внутри объемов, в которых размещаются монтажные платы электронных устройств. Воздействие этих полей на электрические цепи электронных плат вызывает появление в них паразитных напряжений и токов, которые могут нарушить режим нормального функционирования ЭТС. В зависимости от уровня воздействия нарушение нормального режима работы ЭТС начинается от помехового и заканчивается необратимым отказом функционирования вследствие теплового поражения активных элементов электронной схемы.

Рассмотрим в качестве объекта воздействия колебательный электрический контур. Пусть он не содержит нелинейных элементов и характеризуется парой релаксационных параметров: временем установления тока в контуре  $\tau_y$  и временем его релаксации  $\tau_p$ . Будем считать, что процессы релаксации описываются экспоненциальной зависимостью, а  $\tau_p \geq \tau_y$ .

Пусть ток в контуре возбуждается импульсным источником напряжения с амплитудой  $U$ , с длительностью импульсов  $\tau$  и интервалом между ними  $T_0$  (рис. 1).

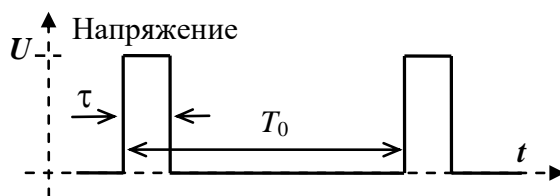


Рис. 1. Модельная последовательность импульсов возбуждения контура

Выбор импульса возбуждения простейшего вида обусловлен тем, что он оказывает ударное сверхширокополосное воздействие на контур, раскачивая в нем собственные (резонансные) колебания тока. Это упрощает постановку задачи и ее решение.

Введем относительную длительность импульса возбуждения  $T_{и} = \tau / \tau_y$ . Будем называть этот импульс коротким или умеренной длительности, если  $T_{и} \ll 1$  или  $T_{и} \sim 1$ , соответственно.

Введем относительный интервал времени между импульсами возбуждения  $T_p = T_0 / \tau_p$ . Будем называть последовательность этих импульсов «редкой», если время релаксации возбуждения контура  $\tau_p \ll T_0$  (соответствующее значение  $T_p \gg 1$ ), «плотной», если  $\tau_p \gg T_0$  ( $T_p \ll 1$ ), и умеренно «плотной», если  $\tau_p \sim T_0$  ( $T_p \sim 1$ ). Пусть в случае «плотной» последовательности инициированных в контуре импульсов они складываются в одной фазе.

Будем оценивать значения индуцированного в цепи тока по огибающей его амплитудных значений. Вычислим эти значения по окончании каждого импульса возбуждения и определим их зависимость от частоты следования импульсов.

Пусть импеданс контура на частоте его резонанса равен  $\rho$ . Нормируем ток в контуре на его предельное значение  $U/\rho$ .

К концу первого импульса в контуре возникнет ток с амплитудой

$$i_1 = 1 - e^{-T_{и}} < 1, \quad (1)$$

к началу второго –  $i_1 e^{-T_p}$ , к его концу –  $i_2 = i_1 e^{-T_p} + i_1 \cdot (1 - i_1 e^{-T_p})$ , а к концу  $N$ -го импульса –

$$i_N = i_{N-1} e^{-T_p} + i_1 \cdot (1 - i_{N-1} e^{-T_p}). \quad (2)$$

Преобразование этого рекуррентного соотношения сводится к сумме членов геометрической прогрессии

$$i_N = i_1 (1 + Z + Z^2 + \dots + Z^{N-1}) = i_1 \frac{1 - Z^N}{1 - Z}, \quad (3)$$

где  $Z = e^{-T_p} (1 - i_1) = e^{-(T_n + T_p)}$ , ( $0 < Z < 1$ ).

Поскольку  $Z < 1$ , то отношение  $i_N / i_1 = (1 - Z^N) / (1 - Z) > 1$ . То есть при заданном законе релаксации и любых релаксационных параметрах контура ( $T_n, T_p$ ) результат последовательных воздействий накапливается. При этом важно отметить, что ток  $i_N$  не может быть больше предельного значения

$$i_N = i_1 \frac{1 - Z^N}{1 - Z} = \frac{1 - e^{-T_n}}{1 - e^{-(T_n + T_p)}} (1 - Z^N) < 1 - Z^N < 1. \quad (4)$$

Рассмотрим последовательности импульсов возбуждения, различающиеся частотой их следования.

*«Редкая» последовательность импульсов.* Когда интервал следования импульсов  $T_0$  относительно большой ( $T_p \gg 1$ ), то

$$i_N = i_1 \frac{1 - e^{-T_p N}}{1 - e^{-T_p}} \approx i_1. \quad (5)$$

В этом случае каждый из  $N$  импульсов, инициируемых в контуре, будет иметь амплитуду, примерно равную амплитуде тока первого импульса вне зависимости от частоты следования импульсов возбуждения.

*«Плотная» последовательность импульсов.* Когда релаксация возбуждения длительная ( $T_p \ll 1$ ), то при любой длительности импульсов возбуждения ( $T_n$ ) в контуре устанавливается квазистационарный уровень тока, близкий к его предельному значению,

$$i_N = i_1 \frac{1 - e^{-T_n N}}{1 - e^{-T_n}} = (1 - e^{-T_n}) \frac{1 - e^{-T_n N}}{1 - e^{-T_n}} \xrightarrow{N \gg 1} 1. \quad (6)$$

В этом случае амплитуда установившегося тока  $i_N$  не зависит от частоты следования импульсов возбуждения (нет зависимости от  $T_p$ ). Эта частота вместе с  $T_n$  определяет только время достижения заданного значения амплитуды наведенного тока. Например, ток достигает значения  $i_N \approx 0.9$  к импульсу с номером  $N^* \approx 2.3/T_n$ , т.е. к моменту времени  $N^* T_0$ . И чем меньше относительная длительность воздействующего импульса ( $T_n$ ), тем большее число импульсов  $N^*$  требуется для накопления тока в контуре до заданного значения.

Длительность  $N^* T_0$  процесса накопления тока уменьшается при увеличении частоты следования импульсов, а установившаяся амплитуда тока зависит от числа импульсов возбуждения и не зависит от частоты их следования.

Результатом инициирования «плотной» последовательности импульсов возбуждения может быть значительное увеличение тока в контуре в сравнении с первым импульсом ( $i_N/i_1 \sim 1/T_n$ ).

*Умеренно «плотная» последовательность импульсов.* При умеренных параметрах релаксации, когда  $\tau_p \sim T_0$  ( $T_p \sim 1$ ), установившееся значение тока в контуре зависит от частоты следования импульсов возбуждения. Например, при  $T_n = T_p = 1$

$$i_N = i_1 \frac{1 - e^{-2N}}{1 - e^{-2}} < \frac{i_1}{1 - e^{-2}} \leq 1.16 i_1 < 0.73. \quad (7)$$

Отметим, что в этом случае установившийся в контуре ток  $i_N$  будет несколько больше, чем  $i_1$ , но он уже не достигнет предельного значения. Установившееся значение  $i_N$  будет увеличиваться при увеличении частоты  $T_0^{-1}$  следования импульсов возбуждения контура или увеличении времени  $\tau_p$  его релаксации.

При умеренной длительности релаксации возбуждения ( $T_p \sim 1$ ) и относительно коротком импульсе возбуждения ( $T_n \ll 1$ ) установившееся значение тока в контуре значительно меньше его предельного значения

$$i_N \approx 1.6 \cdot i_1 \approx 1.6 \cdot T_n \ll 1. \quad (8)$$

При воздействии умеренно «плотной» последовательности коротких импульсов установившаяся амплитуда тока может быть увеличена по отношению к амплитуде первого импульса, но конечная амплитуда тока будет значительно меньше предельного значения.

По результатам рассмотрения реакции электрического контура на периодическое сверхширокополосное возбуждение можно сделать следующие выводы.

1 Периодическая последовательность импульсов, инициированных в электрическом контуре, может быть «редкой», «плотной» или умеренно «плотной».

2 В случае «редкой» и «плотной» последовательности установившаяся амплитуда тока в контуре не зависит от частоты следования импульсов его возбуждения и зависит, если последовательность умеренно «плотная». В последнем случае амплитуда тока увеличивается при увеличении частоты следования импульсов.

3 Отношение конечной амплитуды тока в контуре к амплитуде тока первого импульса зависит от типа инициированной в контуре последовательности («редкая»...«плотная»), а также относительной длительности импульса возбуждения. Максимальное значение амплитуды тока может быть достигнуто при инициировании в контуре «плотной» последовательности импульсов. При этом длительность импульсов возбуждения  $T_n$  может быть любой.

Во всех случаях предпочтительным является импульс возбуждения умеренной длительности  $T_n \sim 1$ . При этом условия квазистационарные параметры возбуждения контура устанавливаются при минимальном числе импульсов и, соответственно, минимальной длительности воздействия.

4 Если ударное воздействие импульса напряжения возбуждает в контуре собственные (резонансные) колебания с шириной частотной полосы  $\Delta f_\lambda$ , то  $\tau_p \approx 1/\Delta f_\lambda$ . Соотношение  $\Delta f_\lambda$  и частоты следования импульсов  $f_0$  определяет степень «плотности» инициированной в контуре последовательности импульсов. Если в сравнении с  $f_0$  полоса  $\Delta f_\lambda$  узкая ( $\Delta f_\lambda < f_0$ ), то последовательность инициированных импульсов является «плотной», а если  $\Delta f_\lambda > f_0$ , то «редкой».

## 2. К определению необходимой длительности воздействия

Оценим, каким числом импульсов можно ограничить длительность воздействия.

Отношение длительности процесса релаксации параметров возбуждения контура к интервалу времени между импульсами возбуждения ( $\tau_p/T_0$ ) характеризует емкость «памяти» контура – число импульсов возбуждения, которые умещаются в интервале времени  $\tau_p$  и действуют коллективно. Именно это количество импульсов определяет установившиеся параметры электрического возбуждения контура.

Когда число импульсов возбуждения в последовательности  $N > \tau_p/T_0$  (т.е. «память» контура относительно короткая), то такая длина последовательности импульсов является избыточной. Ее можно ограничить одним импульсом, если  $\tau_p/T_0 \ll 1$ , или числом импульсов  $N^*$ , равным емкости «памяти» контура ( $N^* = \tau_p/T_0$ ).

Если емкость «памяти» контура больше, чем число импульсов возбуждения в периодической последовательности  $\tau_p/T_0 > N$ , то конечные параметры возмущения контура будут определяться числом  $N$  импульсов возбуждения.

Таким образом оптимальная длительность импульсно-периодического воздействия на контур определяется временем релаксации его возбуждения. Реальный контур может содержать нелинейные элементы с инерционным



откликом на включение/выключение воздействия. В этом случае время релаксации будет зависеть от уровня возбуждения контура.

### 3. Модель зависимости пороговых значений параметров угрозы воздействия излучения от частоты следования импульсов

Перейдем от контура, как элементарной модели объекта ЭМ воздействия («приемника»), к ЭТС, для которого воздействие мощного радиочастотного излучения создает угрозу нарушения нормального режима его функционирования.

Как уже было отмечено, в экспериментах наблюдается повышение уровня угрозы воздействия при увеличении частоты следования импульсов излучения. Иными словами, излучатель с более высокой частотой генерации импульсов создает угрозу воздействия с бóльших расстояний, т.е. при меньшей амплитуде этих импульсов.

Регистрируемым параметром излучения, падающего на ЭТС, как правило, является напряженность импульсного электрического поля или пиковое (импульсное) значение плотности потока энергии излучения. Пороговое значение ППЭ (обозначим его  $P_{\text{пор}}$ , Вт/м<sup>2</sup>), есть значение, начиная с которого угроза воздействия излучения реализуется.

Следуя экспериментальным данным и результатам уже рассмотренной здесь задачи, представим модель зависимости  $P_{\text{пор}}(f_0)$  в следующем виде (рис. 2):

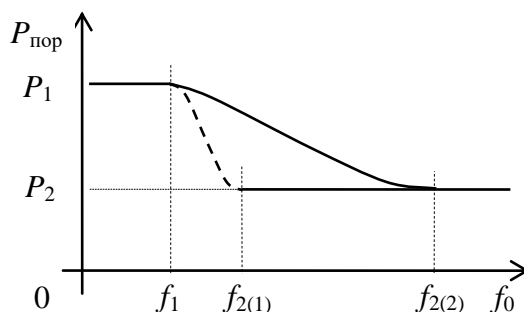


Рис. 2. Модель зависимости пороговых значений пиковой ППЭ при частотно-импульсном воздействии.

Здесь  $P_1$  – пороговое значение  $P_{\text{пор}}(f_0)$  для «редкой» последовательности инициируемых импульсов, а  $P_2$  – для «плотной». Для этих последовательностей зависимость  $P_{\text{пор}}$  от частоты следования импульсов выражена слабо. В первом случае инициируемые импульсы воспринимаются «приемником» как изолированные единичные, а во-втором, они образуют квазистационарную последовательность.

В интервале частот  $f_0 \in (f_1, f_2)$  значения  $P_{\text{пор}}(f_0)$  монотонно уменьшаются от  $P_1$  до  $P_2$ . В этом интервале последовательность инициированных излучением импульсов является умеренно «плотной». Нет достоверных данных о том, быстро ( $P_1 f_1 > P_2 f_2$ ) или медленно ( $P_1 f_1 < P_2 f_2$ ) изменяется функция  $P_{\text{пор}}(f_0)$  в интервале  $(f_1, f_2)$ . Поэтому будем исходить из того, что здесь возможны оба варианта, обозначенные на рис. 2 сплошной и пунктирной линией.

Построим зависимость пороговых значений интенсивности излучения  $I_{\text{пор}}(f_0)$ , соответствующую  $P_{\text{пор}}(f_0)$ .

При фиксированной спектральной структуре единичного импульса излучения интенсивность  $I(f_0)$  их последовательности – среднее значение ППЭ на объекте воздействия – пропорциональна произведению  $P(f_0)f_0$ . На правой границе интервала  $(0, f_1)$  пороговое значение интенсивности равно  $I_{\text{пор}}(f_1) = P_1 f_1$ , а на левой границе интервала  $(f_2, \infty)$  –  $I_{\text{пор}}(f_2) = P_2 f_2$  (рис. 3).

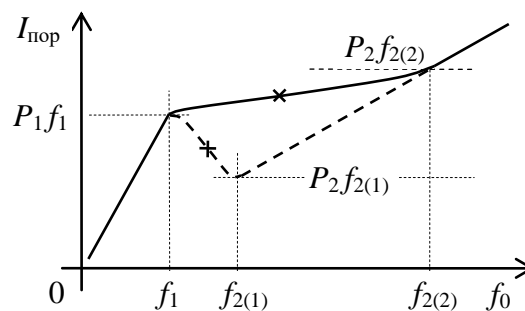


Рис. 3. Пороговые значения интенсивности частотно-импульсного излучения (пунктир – для «быстрого» спада зависимости  $P_{\text{пор}}(f_0)$ ).

Зависимости  $I_{\text{пор}}(f_0)$  в интервале  $(f_1, f_2)$  прорисованы качественно и не являются кусочно-линейными.

Непрерывный переход из точки  $I_{\text{пор}}(f_1)$  в точку  $I_{\text{пор}}(f_2)$  может быть осуществлен по двум траекториям, определяемым значением отношения  $I_{\text{пор}}(f_2)/I_{\text{пор}}(f_1)$ . При условии  $I_{\text{пор}}(f_2)/I_{\text{пор}}(f_1) > 1$  – зависимость  $I_{\text{пор}}(f_0)$  монотонно возрастающая ( $dI_{\text{пор}}/df_0 > 0$ ), а при условии  $I_{\text{пор}}(f_2)/I_{\text{пор}}(f_1) < 1$  – немонотонная. В обоих случаях вторая производная  $d^2I_{\text{пор}}/d^2f_0$  меняет знак с отрицательного значения на положительное – иначе не согласовать непрерывный и плавный переход с одной линейной «траектории»  $I_{\text{пор}}(f_0) = P_1 f_0$  при  $f_0 \leq f_1$  на другую –  $I_{\text{пор}}(f_0) = P_2 f_0$  при  $f_0 \geq f_2$ .

В точках перегиба (маркеры на рис. 3) эффект коллективного воздействия импульсов в умеренно «плотной» последовательности проявляется наиболее сильно. Если оптимизировать процесс именно по этому признаку, то частота следования импульсов, соответствующая точке перегиба, является оптимальной. Если же оценивать потенциал угрозы воздействия излучения, то он максимален на границе перехода от умеренно «плотной» последовательности к «плотной», т.е. при частоте  $f_0 = f_2$ . При немонотонной зависимости  $I_{\text{пор}}(f_0)$  максимальная угроза воздействия, т.е. результирующего воздействия с максимального расстояния, достигается при минимальной интенсивности излучения.

В случае монотонной зависимости  $I_{\text{пор}}(f_0)$  эффект коллективного воздействия импульсов в умеренно «плотной» их последовательности замедляет скорость изменения функции  $I_{\text{пор}}(f_0)$ , а в случае немонотонной зависимости этот эффект проявляется еще сильнее: скорость изменения  $I_{\text{пор}}(f_0)$  уменьшается настолько, что уменьшаются также и значения  $I_{\text{пор}}(f_0)$  (см. рис. 3).

Являются ли обе эти зависимости физически реалистичными? Пока нет достаточных оснований, не станем исключать из рассмотрения ни одну из них.

#### **4. Оценка зависимости порогового расстояние угрозы воздействия от частоты следования импульсов излучения**

Построим зависимость пороговой дистанции угрозы воздействия излучения  $R_{\text{пор}}(f_0)$  при двух условиях: когда либо эффективная пиковая

(импульсная) мощность излучателя не зависит от  $f_0$ , либо эффективная средняя. Эффективная пиковая мощность пропорциональна произведению  $P(f_0)R^2$ , а эффективная средняя  $\sim P(f_0)\tau_{эф}f_0R^2$ . Здесь  $\tau_{эф}$  – длительность импульса излучения, по которой определяется плотность энергии этого импульса  $P(f_0)\tau_{эф}$ , а  $R$  – расстояние до точки наблюдения параметров излучения. В дальней зоне излучения  $\tau_{эф}$  не зависит от  $R$ .

Пусть, для начала, эффективная пиковая мощность излучателя не зависит от частоты  $f_0$ , т.е.  $P(f_0)R^2 = \text{const}$ .

На частотах  $f_0 < f_1$  и  $f_0 > f_2$ , т.е. там, где  $P_{\text{пор}}$  от  $f_0$  не зависит,  $R_{\text{пор}} = \text{const}$ . В интервале  $(f_1, f_2)$ , где  $P_{\text{пор}}(f_0)$  монотонно уменьшается, пороговая дальность  $R_{\text{пор}}$  угрозы воздействия умеренно «плотной» последовательности импульсов излучения монотонно возрастает от порогового значения  $R_1 = R_{\text{пор}}(f_1)$  и равна

$$R_{\text{пор}}(f_0^*) = R_1 \sqrt{P_1 / P_{\text{пор}}(f_0^*)} \leq R_1 \sqrt{P_1 / P_{\text{пор}}(f_2)} = R_1 \sqrt{P_1 / P_2} = R_2. \quad (9)$$

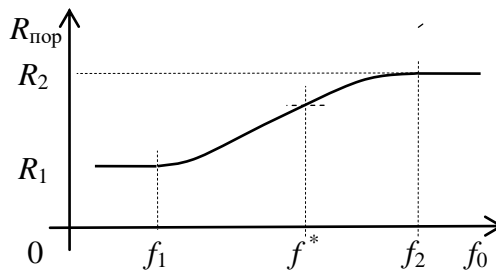


Рис. 4. Зависимость порогового расстояния угрозы воздействия излучения от частоты следования импульсов при фиксированной эффективной пиковой мощности излучателя.

Увеличение  $f_0^*$  сверх частоты  $f_2$  не рационально, поскольку при этом  $R_{\text{пор}}$  практически не увеличивается ( $R_{\text{пор}} \approx R_2$ ), а средняя мощность излучения и мощность, потребляемая излучателем, увеличивается пропорционально  $f_0$ . Поэтому излучатель, эффективная пиковая мощность которого не зависит от  $f_0$ , реализует максимальную угрозу воздействия излучения при частоте следования импульсов  $f_0 \approx f_2$ .

Теперь оценим зависимость  $R_{\text{пор}}(f_0)$  при условии постоянства эффективной средней мощности излучателя, т.е. при  $P(f_0)\tau_{\text{эф}}f_0R^2 = \text{const}$ . Это важно по двум причинам. Во-первых, средняя мощность излучения определяет среднюю мощность потребления энергии излучателем, а значит его весовые характеристики. Во-вторых, решение задачи в такой постановке может дать ответ на вопрос, какой из параметров является приоритетным при проектировании эффективного средства импульсного ЭМ воздействия, амплитуда импульсов или частота их следования.

Эффективная средняя мощность излучателя определяется средней мощностью  $P_{\text{ГВ}}$  генератора возбуждения антенно-фидерной системы излучателя и коэффициентом  $G$  направленного действия АФС

$$GP_{\text{ГВ}} \sim PR^2\tau_{\text{эф}}f_0. \quad (10)$$

В соответствии с условием решаемой задачи, для пороговых значений  $P$  и  $R$  получим

$$R_{\text{пор}}(f_0) \sim \frac{1}{\sqrt{P_{\text{пор}}(f_0)\tau_{\text{эф}}f_0}} = \frac{1}{\sqrt{I_{\text{пор}}(f_0)}}. \quad (11)$$

На рис. 5 зависимость  $R_{\text{пор}}(f_0)$  представлена для монотонной 1 и немонотонной 2 зависимости  $I_{\text{пор}}(f_0)$ .

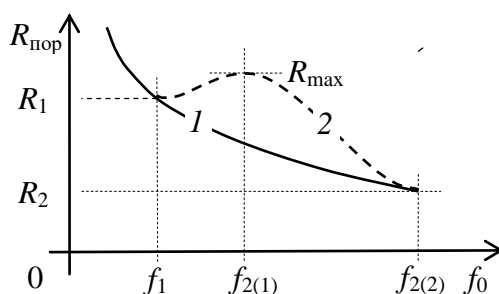


Рис. 5. Зависимость порогового расстояния угрозы воздействия импульсов излучения для монотонной 1 и немонотонной 2 зависимости  $I_{\text{пор}}(f_0)$  при фиксированной эффективной средней мощности излучателя.

В соответствии с (11), при монотонно возрастающей зависимости  $I_{\text{пор}}(f_0)$  пороговое значение  $R_{\text{пор}}(f_0)$  монотонно уменьшается. Это означает, что из двух излучателей с одинаковой эффективной средней мощностью излучения в

заданном интервале частотного спектра бóльшую дальность угрозы воздействия представляет тот, который генерирует импульсы излучения с меньшей частотой повторения, а следовательно более высоким значением электродинамического потенциала  $ER$  (В).

Если зависимость  $I_{\text{пор}}(f_0)$  немонотонна, то в интервале  $(f_1, f_{2(2)})$  расстояние  $R_{\text{пор}}(f_0)$  больше тех значений, что достигаются в случае монотонной зависимости  $I_{\text{пор}}(f_0)$ . Пороговое значение дистанции угрозы достигает локального максимума  $R_{\text{max}}$  при частоте следования импульсов  $f_{2(1)}$ , соответствующей минимальному значению интенсивности излучения:

$$R_{\text{max}} = R_1 \sqrt{\frac{I_{\text{пор}}(f_1)}{I_{\text{пор}}(f_{2(1)})}} > R_1. \quad (12)$$

Из представленных здесь примеров следует, что приоритетным параметром, определяющим уровень угрозы частотно-импульсного воздействия излучения на ЭТС, является амплитуда импульса. Частота их следования вторична. Как было показано, уровень воздействия может от этой частоты и не зависеть. Действительно, нормальный радиочастотный эфир наполнен сигналами как импульсными, так и непрерывными, но они не изменяют качество функционирования ЭТС.

## **5. Параметры, характеризующие потенциал угрозы воздействия сверхширокополосного излучения**

Набор первичных параметров, характеризующих излучение, падающее на ЭТС, является общим, в том числе и для любой из выделенных здесь областей, различающихся по степени перекрытия во времени электрических возмущений, инициируемых периодическим воздействием импульсов излучения ( $\tau_p \ll 1/f_0$ ,  $\tau_p \sim 1/f_0$  и  $\tau_p \gg 1/f_0$ ). Поскольку процессы в этих областях различаются качественно, то параметры, характеризующие потенциал угрозы воздействия излучения на ЭТС в каждой из них, не могут быть одинаковыми.

Функциональное состояние ЭТС при воздействии на него излучения может быть изменено, если им поглощена некоторая энергия со скоростью

(мощностью), превышающей скорость диссипации энергии паразитных ЭМ возмущений в «структурах» ЭТС, вызывающих те или иные «дефекты» его функционирования (от помехи до теплового разрушения активных элементов). Таким образом чтобы изменить качество функционирования ЭТС необходимо доставить в частотную полосу его восприимчивости энергию излучения с мощностью выше порогового значения.

Любой «приемник» излучения характеризуется шириной частотной полосы чувствительности к этому излучению, т.е. частотным спектром поглощения энергии. По отношению к сверхширокополосному (СШП) частотному спектру «приемник» является относительно узкополосным. По этой причине потенциал угрозы ударного внеполосного воздействия импульсов СШП излучения следует определять плотностью его энергетического спектра [5]. Поскольку для произвольного «приемника» не может быть полных данных о спектре поглощения энергии излучения, то параметры угрозы воздействия излучения будем характеризовать средним значением плотности энергетического спектра излучения в пределах ширины этого спектра.

*Потенциал угрозы воздействия единичного импульса СШП излучения определяется значением*

$$\bar{q}_{\Delta} \left( \text{Дж/м}^2 / \text{Гц} \right) \approx \varepsilon \tau \sim (E\tau)^2, \quad (13)$$

где  $E$  (В/м) – напряженность поля излучения ЭТС;  $\tau$  – длительность импульса, определяющая полную ширину его энергетического спектра ( $1/\tau$ , Гц);

$\varepsilon \left( \text{Дж/м}^2 \right) = \int \frac{E^2}{Z_0} dt \sim E^2 \tau$  – плотность энергии единичного импульса излучения

( $Z_0 = 120\pi$ , Ом).

Произведение  $E\tau$  (В/м/Гц) характеризует спектральную плотность  $S(f_{\lambda})$  импульса  $E(t)$ . В упомянутом стандарте США [4] значением параметра оценивается уровень угрозы воздействия единичного импульса широкополосного и СШП излучения.

Напряженность  $E$  поля излучения на удалении  $R$  от апертурной антенны по ее оси определяется в соответствии с

$$E \sim \frac{1}{R} \cdot \frac{dU_A}{dt} \cdot \frac{A}{c} \sim \frac{U_A}{R} \cdot \frac{A}{c\tau}, \quad (14)$$

где  $U_A(t)$  – напряжение возбуждения антенны,  $A$  – размер ее апертуры,  $c$  – скорость распространения ЭМ волны. Откуда следует, что произведение  $E\tau \sim U_A A$ .

Таким образом значение потенциала угрозы ударного воздействия единичного импульса СШП излучения зависит только от амплитуды импульса возбуждения антенны, создающей это излучение, и размера ее апертуры. Амплитудное значение  $S(f_\lambda)$  не зависят от длительности импульса излучения  $\tau$  явно, но распределение  $S(f_\lambda)$  по частотному спектру зависит: чем короче импульс, тем шире его спектр и «беднее» заполнение низкочастотной его части.

В случае частотно-импульсной последовательности распределение энергии СШП излучения в частотной области может быть и сплошным и дискретным [6]. Причем, даже когда спектр излучения линейчатый, «приемник» может воспринимать его как сплошной, если ширина частотной полосы его чувствительности больше, чем интервал  $f_0$  между линиями спектра. Если это так, то уровень энергетического воздействия характеризуется значением спектральной плотности интенсивности излучения

$$f_0 \bar{q}_\Delta \left( \text{Вт/м}^2 / \text{Гц} \right) \approx f_0 \varepsilon \tau = \varepsilon / g_0 \sim f_0 (U_A A)^2 \quad (15)$$

или частотой  $f_0$  следования импульсов в сочетании с потенциалом угрозы  $\bar{q}_\Delta$  воздействия каждого ( $g_0$  – скважность последовательности импульсов).

Если «приемник» воспринимает частотный спектр излучения последовательности импульсов как линейчатый, а это означает, что только одна линия спектра попадает в полосу его чувствительности, тогда потенциал угрозы определяется интенсивностью излучения одной линии спектра

$$f_0^2 \bar{q}_\Delta \left( \text{Вт/м}^2 \right) \approx f_0^2 \varepsilon \tau \sim (f_0 E \tau)^2 = (E / g_0)^2 \sim (f_0 U_A A)^2 \quad (16)$$



Таким образом среднее значение ППЭ в одной линии спектра «плотной» последовательности импульсов СШП излучения как и в случае квазистационарного СВЧ сигнала определяется напряженностью электрического поля излучения. А поскольку число линий в спектре СШП сигнала равно  $g_0$ , то, в соответствии с (16), действующее значение напряженности поля в одной линии равно  $E/g_0$  и оно зависит от амплитуды импульса возбуждения антенны, размера ее апертуры и частоты следования импульсов излучения.

## Выводы

1. Периодическая последовательность импульсов излучения может инициировать в структурах ЭТС «редкую», умеренно «плотную» и «плотную» последовательность электрических возмущений. Во всех случаях, чем больше амплитуда импульса излучения, тем больше уровень угрозы его воздействия.

2. Уровень угрозы воздействия, инициирующего «редкую» и «плотную» последовательность импульсов, не зависит от частоты следования импульсов возбуждения, а в случае умеренно «плотной» последовательности – увеличивается при увеличении этой частоты.

3. Оптимальная длительность импульсно-периодического воздействия на ЭТС определяется характерным временем релаксации цепей электрической схемы ЭТС при возбуждении этих цепей с заданной интенсивностью.

4. Потенциал угрозы воздействия последовательности СШП импульсов излучения на относительно узкополосный «приемник» характеризуют параметры излучения, нормированные на единичный спектральный интервал, а также частотный интервал шириной  $f_0$ :

– для «редкой» последовательности импульсов – это спектральная плотность плотности энергии  $\varepsilon$  (Дж/м<sup>2</sup>) импульса излучения  $\bar{q}_\Delta$  (Дж/м<sup>2</sup>/Гц) или спектральная плотность этого сигнала  $E\tau$  (В/м/Гц);

– для умеренно «плотной» последовательности импульсов со сплошным СШП частотным спектром – это параметр, характеризующий единичный

импульс излучения ( $\bar{q}_\Delta$  или  $E\tau$ ) в сочетании с частотой  $f_0$  следования этих импульсов или с параметром, характеризующим интенсивность излучения в единичном спектральном интервале  $\varepsilon/g_0$  (Вт/м<sup>2</sup>/Гц);

– для «плотной» последовательности импульсов излучения с частотным спектром, линейчатым для «приемника», – это параметр  $E/g_0$  (В/м), характеризующим эффективную напряженность электрического поля одной линии спектра излучения.

5. Степень «плотности» последовательности импульсов, инициированных излучением в структурах электронной схемы ЭТС, априори не известна. Поэтому в общем случае потенциал угрозы воздействия частотно-импульсного СШП излучения следует характеризовать следующим набором параметров: спектральной плотностью единичного импульса ( $E\tau$  или  $\bar{q}_\Delta$ ), спектральной плотностью интенсивности излучения ( $\varepsilon/g_0$ ) и эффективной напряженностью электрического поля одной линии спектра излучения ( $E/g_0$ ).

6. Ни один из параметров, характеризующих потенциал угрозы воздействия частотно-импульсного СШП излучения, не зависит явно от длительности импульса излучения  $\tau$ , но распределение значений этих параметров по частотному спектру от  $\tau$  зависит.

### Литература

1. Вдовин В.А., Кулагин В.В., Черепенин В.А. Помехи и сбои при нетепловом воздействии короткого электромагнитного импульса на радиоэлектронные устройства // Электромагнитные волны и электронные системы, 2003, т. 8, №1, с.64-73.
2. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / Под ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.: ил.

3. Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю.М. Перунова. – М.: «Радиотехника», 2003. – 416 с.: ил.
4. MIL-STD-464C, Department of Defense interface standard: Electromagnetic Environmental Effects, requirements for systems (01 dec 2010). URL: [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-464C\\_28312](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-464C_28312).
5. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: «Высш. школа», 1983. – 536 с.
6. Осташев В.Е., Ульянов А.В. Особенности спектральной структуры последовательности видеоимпульсов // В тр. 9-го Международного симп. по эл.-магн. совместимости и эл.-магн. экологии. С.-Петербург, 13-16 сентября 2011 г. СПб.: ООО «АльфаГарант», 2011. – С. 299-302.

**Для цитирования:**

В. Е. Осташев, А. В. Ульянов. Параметры угрозы частотно-импульсного воздействия излучения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/13/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.13