

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.868; 621.382

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭНЕРГИИ, СПЕКТРА И ДЛИТЕЛЬНОСТИ СВЕРХКОРОТКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА С ЕГО ВРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ

© 2024 г. В. Г. Усиченко, Л. Н. Сорокин*

Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем,
наб. Обводного канала, 29, Санкт-Петербург, 191167 Российская Федерация

*E-mail: sorokinln@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2023 г.

После доработки 29.08.2023 г.

Принята к публикации 24.11.2023 г.

Двумя способами определены энергия и длительность сверхкороткого электромагнитного импульса, распространяющегося по оси излучения в дальней зоне — по форме напряженности его электрического поля и по энергетическому спектру. В обоих случаях энергия импульса оказывается одинакова, но длительность и пиковая амплитуда различаются на десятки процентов. Дана сравнительная оценка энергии, рассеиваемой в полупроводниковых элементах автоматизированных технических устройств, облучаемых сверхкороткими и прямоугольными сверхвысокочастотными импульсами. Показано, что воздействие СВЧ-импульса является более эффективным на несущих частотах порядка сотен мегагерц и менее.

Ключевые слова: сверхкороткий электромагнитный импульс, пиковая амплитуда, энергия, длительность, энергетический спектр, энергия, рассеиваемая в нагрузке

DOI: 10.31857/S0033849424110036, **EDN:** NOKEWM

ВВЕДЕНИЕ

Распространяющийся в дальней зоне быстро меняющийся во времени сверхкороткий электромагнитный импульс (СКЭМИ) характеризуют [1] временной зависимостью его электрического поля $E(t)$, которую обычно определяют с помощью линейного полоскового измерителя поля (ИППЛ). При изменении расстояния r между антенной излучателя и облучаемым объектом форма $E(t)$ на оси луча меняется слабо. В этом случае остается практически постоянным произведение rE_p (E_p — пиковое значение поля на расстоянии r).

При испытании различных технических устройств на устойчивость к электромагнитным воздействиям помимо пикового значения E_p поля обычно указывают длительность импульса τ , строгое определение которой в ГОСТах отсутствует. Поэтому часто приводят ширину пикового импульса на половине $E_p/2$ его высоты [2–4]. Но такое определение больше подходит для униполярных импульсов, а применительно к знакопеременному СКЭМИ ведет к ошибкам. Иногда приводят значение τ , не сообщая о том, каким образом оно определено [5]; иногда приводят длительность фронта импульса, возбуждающего антенну излучателя СКЭМИ [6].

На практике помимо E_p и τ важными информативными параметрами являются энергия, падающая на облучаемый объект, и энергия, рассеиваемая в его нагрузке. Задача становится особенно интересной, если облучается автоматизированное техническое устройство, которое в силу особенностей своего построения и функционирования обладает сверхширокополосной восприимчивостью к электромагнитным полям. В этом случае для оценок нужно знать распределение энергетического спектра падающего СКЭМИ во всем диапазоне частот. Энергия, длительность и спектр непосредственно связаны с временной формой $E(t)$ электрического поля СКЭМИ в области нахождения устройства.

Цель данной работы — дать строгое определение указанным величинам, установить связи между ними и сопоставить по эффективности результативность воздействия на устройство СКЭМИ и СВЧ-импульса.

1. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

В дальней зоне, где находится облучаемый объект, плотность потока энергии (вектор Пойнтинга), переносимой в единицу времени произвольно ме-

нящимся во времени электрическим полем $E(t)$ электромагнитного импульса, имеет вид

$$\frac{1}{Z_0} E^2(t), \text{ Дж/м}^2\text{с},$$

где $Z_0 = 120\pi$ Ом – волновое сопротивление пространства. Энергия, переносимая одним импульсом через площадь 1 м^2 , равна

$$\frac{1}{Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt,$$

т.е. пропорциональна

$$\int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt.$$

Для упрощения формул далее используем этот интеграл, называя его энергией, измеряемой в единицах $\text{В}^2\text{с/м}^2$:

$$\Theta_E = \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt. \quad (1)$$

Разделив энергию (1) на квадрат пиковой амплитуды импульса, получим эффективную длительность СКЭМИ

$$\tau_{\text{эф}} = \frac{1}{E_p^2} \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt.$$

Процедуру нахождения Θ_E и $\tau_{\text{эф}}$ продемонстрируем на примере СКЭМИ, одна из форм которого (формы могут быть разнообразными), измеренная с помощью ИППЛ, приведена на рис. 1 (кривая 1). Видно, что по окончании импульса еще некоторое время продолжают пульсации $e(t)$ поля, вызываемые многочисленными отражениями волн в трактах излучения и приема. На этом же рисунке (кривая 2) продемонстрировано постепенное увеличение энергии импульса

$$\Theta_E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt \approx \int_{t_1}^{t_2+\infty} E^2(t) dt$$

в процессе интегрирования. Реальной будем считать энергию, которая определена в пределах $t_1 \leq t \leq t_2$, где t_1 – время начала импульса, t_2 – время окончания импульса, выбираемое в момент, когда в среднем спадающий «хвост» $E(t)$ опустится ниже среднего значения пульсаций

$$E(t_2) \leq \sqrt{e^2(t_2)}.$$

Обычно интервал интегрирования $(t_2 - t_1)$ выбирают близким к длительности переходной характеристики ИППЛ, которая в нашем случае была равна 4.65 нс. При таком выборе влияние пульсаций $e(t)$ на погрешность измерения минимизируется. Относительная погрешность определяется отношением

$$\delta\Theta_E \approx \left(\overline{e^2(t_2)} + (\Delta E_p)^2 \right) / \int_{t_1}^{t_2} E^2(t) dt, \quad (2)$$

где числитель равен сумме усредненного квадрата пульсаций $\overline{e^2(t_2)}$ и квадрата погрешности измерения пиковой амплитуды $(\Delta E_p)^2$ импульса.

Нормированный интеграл

$$E_p^{-2} \int_{t_1}^{t_2} E^2(t) dt,$$

в точке t_2 дает значение эффективной длительности СКЭМИ, которую, зная Θ_E , можно также найти делением:

$$\tau_{\text{эф}} = \Theta_E / E_p^2.$$

Отсюда следует, что погрешности определения энергии Θ_E и эффективной длительности $\tau_{\text{эф}}$ одинаковы. В частности, у импульса, изображенного на рис. 1, при пиковой амплитуде $E_p = 10^4 \text{ В/м}$ энергия $\Theta_E \approx 0.02 \text{ В}^2\text{с/м}^2$, длительность $\tau_{\text{эф}} \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ с}$.

Поскольку пиковая амплитуда больше амплитуды СКЭМИ, усредненной по его форме, то его значение эффективной длительности занижено. Оценим ошибки, к которым это ведет.

Использование $\tau_{\text{эф}}$ ставит в соответствие реальному СКЭМИ эквивалентный ему по энергии однополярный прямоугольный видеоимпульс, амплитуда которого равна пиковому значению E_p . Энергетический спектр прямоугольного импульса описывается [7] формулой

$$S_{E_p}^2(f) = E_p^2 \tau_{\text{эф}} \eta(\pi f \tau_{\text{эф}}), \quad (3)$$

в которой $E_p^2 \tau_{\text{эф}} = \Theta_E$ – полная энергия импульса, а функция

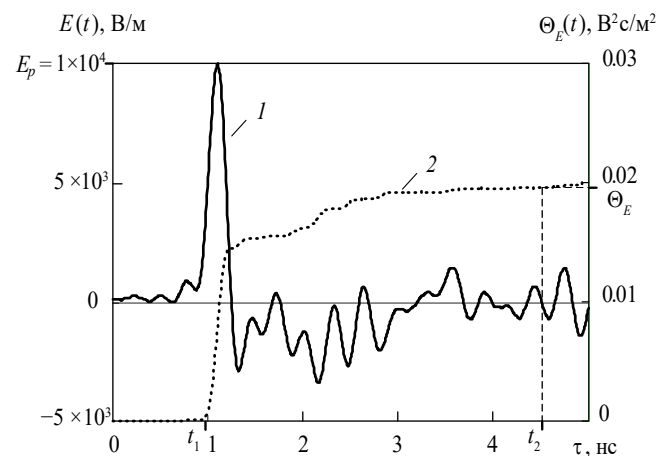


Рис. 1. Временная форма СКЭМИ (кривая 1) и зависимость энергии СКЭМИ от времени (кривая 2).

$$\eta(\pi f_M \tau_{\text{эф}}) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi f_M \tau_{\text{эф}}} \frac{\sin^2(x)}{x^2} dx$$

(где $x = \pi f_M \tau_{\text{эф}}$) определяет относительную долю энергии в полосе частот от 0 до f_M .

Энергетический спектр СКЭМИ с параметрами $E_p = 10^4$ В/м и $\tau_{\text{эф}} \approx 2 \cdot 10^{-10}$ с изображен кривой 1 на рис. 2 в пределах от 0 до $f_M = 2/\tau_{\text{эф}}$.

Если положить $f_M \tau_{\text{эф}} = 1$, то 90% всей энергии импульса сосредоточено в диапазоне частот

$$\Delta f_1 = [0 \leq f \leq 1/\tau_{\text{эф}}] = 1/\tau_{\text{эф}}. \quad (4)$$

Выше говорилось, что эффективная длительность $\tau_{\text{эф}}$ СКЭМИ находится из опыта, погрешность которого точно неизвестна. Если она меньше 10%, то в первом приближении величину

$$E_p^2 \tau_{\text{эф}}^2 = E_p^2 \tau_{\text{эф}} / \Delta f_1 = \Theta_E / \Delta f_1$$

можно также рассматривать как энергетический спектр прямоугольного импульса, приведенный к диапазону частот Δf_1 , в котором содержится 90% его энергии. На рис. 2 пунктирной линией 2 представлен равномерно распределенный по этому диапазону энергетический спектр прямоугольного импульса $\Theta_E / \Delta f_1 = 4 \cdot 10^{-12}$ (В²/м²)/Гц², длительность которого $\tau_{\text{эф}}$.

Таким образом, зная форму СКЭМИ и пиковое значение его амплитуды, мы определили его эффективную длительность $\tau_{\text{эф}}$ и энергетический спектр, усредненный в диапазоне частот $f \leq 1/\tau_{\text{эф}}$.

Применяя равенство Парсеваля [7] к интегралу

$$\int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt,$$

получим энергию СКЭМИ, выраженную непосредственно через его собственный энергетический спектр

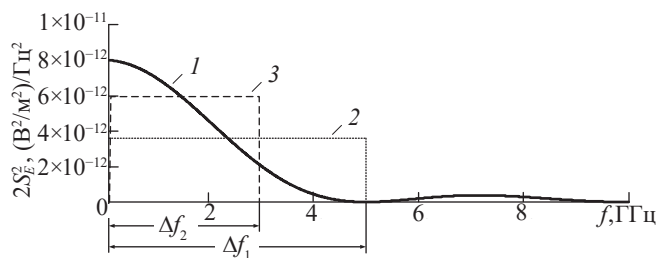


Рис. 2. Энергетические спектры: 1 – спектр прямоугольного видеоимпульса; 2 – спектр прямоугольного видеоимпульса, приведенный к диапазону частот Δf_1 ; 3 – усредненный спектр СКЭМИ, форма которого приведена на рис. 3.

$$\Theta_E = \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt = E_p^2 \tau_{\text{эф}} = \int_0^{\infty} 2S_E^2(f) df. \quad (5)$$

Здесь $2S_E^2(f)$ – квадрат модуля спектра напряженности электрического поля СКЭМИ

$$\dot{S}_E(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) \exp(-j\omega t) dt,$$

выраженный через физическую частоту $f \geq 0$. На рис. 3 (кривая 1) изображен рассчитанный энергетический спектр импульса, форма которого приведена на рис. 1. Сравнение его с зависимостью 1 на рис. 2 показывает, что по виду он существенно отличается от спектра прямоугольного видеоимпульса.

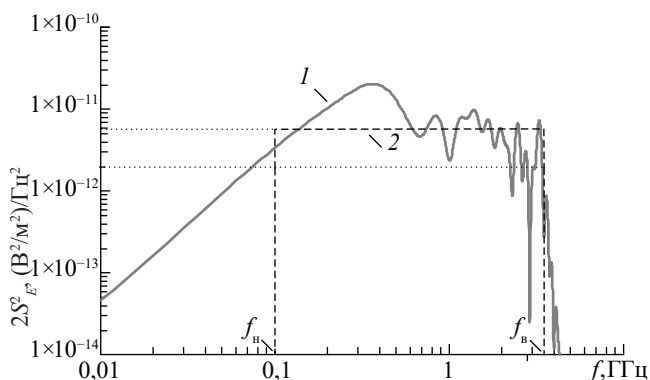


Рис. 3. Энергетический спектр измеренного СКЭМИ: 1 – расчетный; 2 – усредненный в диапазоне частот Δf_2 .

Известно [7], что спектр любого импульса на нулевой частоте равен площади импульса. У электромагнитного импульса, распространяющегося через свободное пространство, площадь

$$\int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt = 0,$$

поэтому спектр СКЭМИ будет снижаться с уменьшением частоты и на нулевой частоте должен быть равен нулю. На рис. 3 спектр снижается, начиная с частоты $f \approx 200$ МГц, но в действительности стремится не к нулю, а плавно переходит к насыщению, связанному (2) с погрешностью измерений формы импульса $E(t)$ и наличием пульсаций $e(t)$, влияющих на точность нахождения энергии Θ_E .

Многообразие форм СКЭМИ ведет к разнообразию их спектров. Для практики полезно иметь простые соотношения, позволяющие быстро оценивать

значения параметров в пределах порядка. Для этого можно использовать усредненные величины.

У энергетического спектра любого СКЭМИ можно выделить диапазон частот $\Delta f_2 = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$ ($f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ — верхняя и нижняя частоты), в котором находится подавляющая часть энергии

$$\Delta \Theta_E = \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} 2S_E^2(f) df,$$

а ее относительное количество равно

$$\Delta \Theta_E / \Theta_E = \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} 2S_E^2(f) df / \int_0^\infty 2S_E^2(f) df.$$

Например, из рис. 3 видно, что на частотах $f_{\text{в}} > 3.5$ ГГц спектр практически обрывается, а на частотах $f_{\text{н}} < 0.1$ ГГц быстро снижается. Пренебрежение энергией низких частот в наихудшем случае дает ошибку $f_{\text{н}}/f_{\text{в}} < 3\%$. Таким образом, в рассматриваемом примере подавляющее количество энергии сосредоточено в диапазоне частот $\Delta f_2 = f_{\text{в}} - f_{\text{н}} \approx 3.4$ ГГц.

Если отношение $\Delta \Theta_E / \Theta_E$ близко к 100%, то среднюю по диапазону Δf_2 плотность спектральной энергии СКЭМИ можно с погрешностью порядка нескольких процентов найти из равенства

$$2\overline{S_E^2(f)} \approx \frac{\Theta_E}{\Delta f_2} \approx \frac{E_p^2 \tau_{\text{эф}}}{\Delta f_2}. \quad (6)$$

Подставив численные значения найденных выше величин, получим

$$2\overline{S_E^2(f)} \approx 5.9 \cdot 10^{-12} \text{ (В}^2/\text{м}^2)/\text{Гц}^2.$$

На рис. 2 и 3 этот усредненный спектр представлен штриховой линией. На рис. 2 площади прямоугольников 2 и 3 практически равны, следовательно, равны энергии импульсов, определенные как по форме СКЭМИ, так и по его спектру. При этом ширина усредненного спектра прямоугольного импульса и ширина спектра реального СКЭМИ соотносятся как $\Delta f_1/\Delta f_2 \approx 1.47$. Во столько же раз меняется и отношение значений энергетических спектров, представленных на рис. 2 пунктирной и штриховой линиями соответственно.

Поскольку в диапазоне частот $\Delta f_2 \approx 3.4$ ГГц сосредоточена подавляющая часть спектра, то по аналогии с (4) можно ввести эквивалентную длительность СКЭМИ $\tau_{\text{эКВ}} = 1/\Delta f_2 \approx 2.95 \cdot 10^{-10}$ с. При этом энергия падающего на объект СКЭМИ принимает вид

$$\begin{aligned} \Theta_E &= \int_0^\infty 2S_E^2(f) df \approx \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} 2S_E^2(f) df \approx \\ &\approx 2\overline{S_E^2(f)} \Delta f_2 = 2\overline{S_E^2(f)} \Delta f_2^2 / \Delta f_2 = E_{\text{эКВ}}^2 \tau_{\text{эКВ}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $E_{\text{эКВ}}^2 = 2\overline{S_E^2(f)} \Delta f_2^2$ — квадрат эквивалентной амплитуды электрического поля СКЭМИ, усредненный в пределах эквивалентной длительности $\tau_{\text{эКВ}} = 1/\Delta f_2$; $E_{\text{эКВ}} = \sqrt{2\overline{S_E^2(f)} \Delta f_2}$ — амплитуда этого поля. Из равенства формул (7) и (5) вытекает равенство

$$E_{\text{эКВ}}^2 \tau_{\text{эКВ}} \approx E_p^2 \tau_{\text{эф}}, \quad (8)$$

из которого следует определение эквивалентной амплитуды СКЭМИ

$$E_{\text{эКВ}} \approx \sqrt{\tau_{\text{эф}}/\tau_{\text{эКВ}}} E_p,$$

характеризуемого эквивалентной длительностью $\tau_{\text{эф}}$. В нашем примере $E_{\text{эКВ}} \approx 0.82 E_p$, $\tau_{\text{эКВ}} = 1.48 \tau_{\text{эф}}$.

Вид функции $E_{\text{эКВ}}(t)$, описывающей развитие во времени процесса, обладающего энергией $E_{\text{эКВ}}^2 \tau_{\text{эКВ}}$ и спектром, отмеченным штриховой линией 3 на рис. 2, нам точно не известен. Возможно, это СВЧ-импульс с прямоугольной формой огибающей, несущая частота которого за время длительности $\tau_{\text{эф}}$ с огромной скоростью перестраивается по какому-то нелинейному закону в диапазоне частот $\Delta f_2 = (0.1 \dots 3.5)$ ГГц.

Таким образом, зная форму СКЭМИ и его пиковую амплитуду E_p , можно определить энергию Θ_E и эффективную длительность импульса $\tau_{\text{эф}}$. Зная же энергетический спектр СКЭМИ, можно найти энергию Θ_E , эквивалентную длительность $\tau_{\text{эКВ}}$ и эквивалентную пиковую амплитуду $E_{\text{эКВ}}$. Энергия в обоих случаях одинаковая, но расчетные амплитуды и длительности импульсов, их усредненные энергетические спектры и протяженности этих спектров в приведенном примере различаются в полтора раза.

2. ЭНЕРГИЯ, РАССЕИВАЕМАЯ В НАГРУЗКЕ СВЧ-ИМПУЛЬСОМ И СКЭМИ

Из формулы Фрииса для идеальной радиопередачи [8, разд. 9–11] вытекает достаточно точное для практики выражение, которое связывает вектор Пойнтинга импульсного узкополосного квазигармонического колебания с мощностью $P_r(t)$, рассеиваемой этим импульсом в нагрузке приемника:

$$\frac{E^2(t)}{Z_0} = \frac{P_r(t)}{A_r},$$

где

$$A_r = \frac{\bar{\lambda}^2 G_r(\bar{f})}{4\pi}$$

— эффективная поглощающая площадь приемной антенны, идеально согласованной со своей нагрузкой; $\bar{\lambda} = c/\bar{f}$ — средняя длина волны колебания (c — скорость света, $\bar{f}$ — средняя несущая частота колебания); $G_r(\bar{f})$ — коэффициент усиления при-

емной антенны на частоте $\bar{f}$. Подставив A_r , получим мощность, рассеиваемую в нагрузке узкополосным СВЧ-колебанием:

$$P_r(t) = \frac{c^2 G_r(\bar{f}) E^2(t)}{4\pi Z_0 \bar{f}^2}.$$

Видно, что мощность уменьшается при увеличении квадрата средней частоты.

Если в нагрузку поступает не вся мощность, падающая на антенну, а часть ее теряется, то можно ввести коэффициент экранирования $\beta^2(\bar{f})$, учитывающий все виды ослабления волны на ее пути к нагрузке. При необходимости зависимость $\beta^2(\bar{f})$ можно определить, тестируя работоспособность устройства при его облучении СВЧ-импульсами разных несущих частот, как это сделано, например, в работе [9]. Найдем рассеиваемую в нагрузке энергию импульса:

$$\Theta_r = \int_{-\infty}^{\infty} P_r(t) dt = \frac{c^2 G_r(\bar{f})}{4\pi Z_0 \beta^2(\bar{f}) \bar{f}^2} \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt. \quad (9)$$

Предположим, что вместо излучателя СВЧ-импульсов используется излучатель сверхширокополосных СКЭМИ. Объектом воздействия является не узкополосный приемник, а устройство, у которого нет специализированных приемных антенн [10]. Таковым может быть робот, автоматизированное, цифровое или любое другое техническое устройство, содержащее полупроводниковые приборы, в которых рассеивается падающая энергия СКЭМИ. В роли антенны выступают по-разному направленные, изогнутые, скрученные металлические поверхности, проводники, шлейфы и полосковые линии, которые, будучи связанными с портами полупроводникового прибора (ПП), образуют сверхширокополосный рецептор. Величина коэффициента усиления такого рецептора в среднем порядка единицы в диапазоне частот [9] примерно от сотен мегагерц до 10 ГГц. Используя равенство Парсевала, получим рассеиваемую в ПП энергию импульса

$$\Theta_r = \frac{c^2}{4\pi Z_0} \int_0^{\infty} \frac{G_r(f)}{\beta^2(f) f^2} 2S_E^2(f) df,$$

выраженную через спектр СКЭМИ. В этой формуле коэффициент усиления сверхширокополосного рецептора $G_r(f)$ и коэффициент экранирования $\beta^2(f)$, трансформируя спектр $2S_E^2(f)$ падающего на устройство СКЭМИ, влияя на количество энергии Θ_r , поглощаемой в ПП.

При сверхширокополосном спектре СКЭМИ энергия Θ_r зависит не только от коэффициентов $G_r(f)$ и $\beta^2(f)$, но и от множителя f^2 , свидетельствующего о преимущественном вкладе низкочастотных составляющих спектра. Чтобы оценить степень влияния этого множителя, вернемся к нижней $f_n \approx 100$ МГц и верхней $f_b \approx 3.5$ ГГц граничным частотам, между которыми находится подавляющая

часть энергии рассмотренного в разд.1 спектра СКЭМИ. Положим, что в пределах этих частот спектр СКЭМИ, коэффициент усиления рецептора и коэффициент экранирования близки к своим средним значениям: $2S_E^2(f)$, $G_r(f)$ и $\beta^2(f)$ соответственно. Вынеся эти величины за пределы интеграла, интегрируя в пределах от f_n до f_b , полагая $f_b \gg f_n$, получим [10] энергию

$$\Theta_r \approx \frac{c^2 \overline{G_r(f)}}{4\pi Z_0 \overline{\beta^2(f)}} \overline{2S_E^2(f)} \int_{f_n}^{f_b} \frac{1}{f^2} df \approx \frac{c^2 \overline{G_r(f)}}{4\pi Z_0 \overline{\beta^2(f)}} \frac{\overline{2S_E^2(f)}}{f_n}. \quad (10)$$

Видно, что рассеиваемая в ПП энергия возрастает при расширении спектра СКЭМИ в область низких частот.

Полагая, что энергия падающих на объект СКЭМИ и СВЧ-импульса одинакова, сравним энергию (10) с энергией (9), рассеиваемой прямоугольным СВЧ-импульсом, у которого амплитуда E_m , несущая частота f_0 и длительность τ_0 .

Заменим в формуле (9) $E^2(t)$ на $E_m^2/2$, полагая коэффициенты усиления рецепторов и коэффициенты экранирования в формулах (9) и (10) одинаковыми. Тогда, опуская общие коэффициенты, получим

$$\frac{\overline{2S_E^2(f)}}{f_n} = \frac{E_m^2 \tau_0}{2f_0^2}. \quad (11)$$

Умножив и разделив левую часть этого выражения на квадрат полосы пропускания Δf_2^2 усредненного спектра СКЭМИ, используя (8), найдем

$$\frac{\overline{2S_E^2(f) \Delta f_2^2}}{f_n \Delta f_2^2} \approx \frac{E_{\text{ЭКВ}}^2 \tau_{\text{ЭКВ}}}{f_n \Delta f_2}.$$

После подстановки правой части полученного выражения в левую часть формулы (11), получим

$$\frac{E_{\text{ЭКВ}}^2 \tau_{\text{ЭКВ}}}{f_n \Delta f_2} \approx \frac{E_m^2 \tau_0}{2f_0^2}. \quad (12)$$

Если энергии падающих импульсов $E_{\text{ЭКВ}}^2 \tau_{\text{ЭКВ}} = E_m^2 \tau_0/2$ одинаковы, то из (12) следует

$$f_0^2 \approx f_n \Delta f_2. \quad (13)$$

Для оценок воспользуемся результатами предыдущего раздела. Подставив $f_n = 1 \cdot 10^8$ Гц, $\Delta f_2 = 3.4 \cdot 10^9$ Гц, получим для несущей частоты СВЧ-импульса $f_0 \approx 5.8 \cdot 10^8$ Гц. Таким образом, при равенстве энергий СКЭМИ и СВЧ-импульса, падающих на устройство со сверхширокополосной электромагнитной восприимчивостью, энергия, рассеиваемая в ПП этими импульсами, при несущей частоте $f_0 = 580$ МГц будет одинакова; при

$f_0 < 580$ МГц рассеиваемая СВЧ-импульсом энергия будет больше, чем у СКЭМИ. При несущих частотах $f_0 > 580$ МГц СВЧ-импульс по эффективности проигрывает СКЭМИ. Из (13) также следует, что в рамках принятых допущений уменьшение произведения $f_n \Delta f_2$ ведет к снижению несущей частоты f_0 , и при сохранении соотношения $f_n \ll \Delta f_2$ зона преимущества СВЧ-импульса сокращается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для определения энергии СКЭМИ, распространяющегося по оси излучения, наиболее просто использовать эффективную длительность $\tau_{\text{эф}}$, которую легко найти, зная пиковую напряженность падающего электрического поля. Для практических оценок этого достаточно. Но эквивалентная длительность $\tau_{\text{экв}}$, выводимая из энергетического спектра СКЭМИ, является более точной и более информативной, так как без спектра СКЭМИ можно только грубо (с погрешностью в десятки процентов) оценить энергию, рассеиваемую импульсом в полупроводниковых элементах технических устройств, обладающих сверхширокополосной электромагнитной восприимчивостью. Это важно при оценке их стойкости к различным видам электромагнитных воздействий.

Показано также, что по сравнению с СВЧ-импульсом воздействие СКЭМИ является более эффективным применительно к роботизированным устройствам, у которых нет специализированных приемных антенн.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-06010). Исследования по данной тематике проводились также в рамках бюджетной НИР FFZF-2022–0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров К. Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2006.
2. Блудов С. Б., Гадецкий Н. П., Кравцов К. А. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20 № 7. С. 712.
3. Camp M., Garber H., Nitsch D. // IEEE Int. Symp. on EMC, Minneapolis, 19–23 Aug., 2002. P. 87.
4. Зиновьев С. В., Евдокимов А. Н., Сахаров К. Ю. и др. // Мед. физика. 2015. № 3. С. 62.
5. Сахаров К. Ю., Туркин В. А., Михеев О. В., Сухов А. В. // Сб. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Электромагнитная совместимость». Москва, 23–24 мая 2019 г. М.: Тестприбор, 2019. С. 91.
6. Сахаров К. Ю., Михеев О. В., Туркин В. А. и др. // Технологии ЭМС. 2006. № 2. С. 44.
7. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.
8. Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. Т. 1.
9. Hoad R., Carter N., Herke D., Watkins S. // IEEE Trans. 2004. V. EMC-46. № 3. P. 390.
10. Усыченко В. Г., Сорокин Л. Н., Усыченко А. С. // РЭ. 2020. Т. 65. № 12. С. 1234.

INTERRELATION OF ENERGY, SPECTRUM AND DURATION OF AN ULTRASHORT ELECTROMAGNETIC PULSE WITH ITS TEMPORARY FORM

V. G. Usychenko, L. N. Sorokin*

*Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Applied Problems",
Obvodny Canal Embankment, 29, St. Petersburg, 191167 Russia
E-mail: sorokinln@mail.ru

Received April 23, 2023; revised August 29, 2023; accepted November 24, 2024

An ultrashort electromagnetic pulse energy and duration propagating along the radiation axis in the far zone are determined in two ways: by the shape of its electric field strength and by the energy spectrum. In both cases, the pulse energy is the same and the duration as well as peak amplitude differ by tens of percent. A comparative assessment is given for the energy dissipated in semiconductor elements of automated technical means irradiated by ultrashort and rectangular microwave frequency pulses. It is shown that the impact of a microwave pulse is better effective at carrier frequencies of the order of hundreds of megahertz and less.

Keywords: ultrashort electromagnetic pulse (USEMP), peak amplitude, energy, duration, energy spectrum, energy dissipated in the load