

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ В КАНАЛЕ  
ПОБОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
USB-ИНТЕРФЕЙСА**

**И. В. Гончаров, Н. А. Коровин, Н. И. Гончаров**

*Закрытое акционерное общество «Научное производственное  
объединение «Инфобезопасность»*

**Поступила в редакцию 05.12.2013 г.**

**Аннотация.** Приводятся результаты расчета пространственно-временных характеристик несинусоидальных электромагнитных полей, образуемых цифровыми сигналами, циркулирующими в последовательных шинах компьютеров при формировании канала побочных электромагнитных излучений. Получены временные, спектральные и энергетические зависимости компонент поля для трех типовых режимов передачи данных.

**Ключевые слова:** несинусоидальное электромагнитное поле, последовательные шины, USB-интерфейс.

**Annotation.** The paper reports the results of calculating the spatial and temporal characteristics of non-sinusoidal electromagnetic fields produced digital signals, circulating in serial buses of computers when forming the channel of side electromagnetic radiations. Temporal, spectral, and energy dependence of the field components for three types of data transmission modes were obtained.

**Keywords:** non-sinusoidal electromagnetic field, serial buses, USB.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время средства вычислительной техники (СВТ) широко применяются практически для решения всех прикладных задач, связанных с обработкой и передачей информации, в различных предметных областях. В состав современных СВТ входят USB-интерфейсы (рис. 1), обеспечивающие передачу данных между системными блоками СВТ и периферийными устройствами [1].

Преимущество последовательных USB-интерфейсов по сравнению с параллельными интерфейсами заключается в том, что в них отсутствует явление перекоса (skew), существенно влияющее на достижимый предел

тактовой частоты. Вполне понятно, что перекоса в параллельных интерфейсах ограничивает и допустимую длину интерфейсных кабелей: при одной и той же относительной погрешности скорости распространения сигналов на большей длине набегают и большие перекосы [2].

Для защиты информации, циркулирующей в USB-интерфейсах, от ее утечки за счет побочных электромагнитных излучений с коммуникаций, соединяющих системные блоки СВТ с периферийными устройствами, важен анализ формирования данных сигналов и излучений.

Информация в интерфейсных кабелях USB-1, USB-2, USB-3 на сигнальном уровне передается в цифровом виде. При этом используются два сигнала: один в качестве логической единицы, а



Рис. 1. Разнообразие средств вычислительной техники, использующих USB-интерфейс

другой – в качестве логического нуля. В настоящее время стандартизованы и применяются на практике три основных скоростных режима передачи информации по каналам USB: медленная (LS) скорость  $V = 1,5$  Мб/с, полная (FS) скорость  $V = 12$  Мб/с и высокая (HS) скорость  $V = 480$  Мб/с [1]. Фактически USB сигналы являются импульсными (сигналами без несущей). Основы теории излучения импульсных (несинусоидальных) сигналов изложены в [3]. Методики расчета параметров электромагнитного поля (ЭМП) и спектральный анализ излучений для входных сигналов видеомонитора приведены в [4, 5].

Целью настоящей статьи является получение пространственно-временных, спектральных и энергетических зависимостей компонент поля, образуемых цифровыми сигналами, циркулирующими в последовательных шинах компьютеров, для трех типовых режимов (LS, FS, HS) передачи данных.

### ИСХОДНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Для определения энергетических пространственно-временных характеристик несинусоидальных ЭМП в данной работе использовался метод дипольного момента. В основе метода лежит определение напряженностей электрических и магнитных полей линейных излучателей (типа диполей Герца) в виде функций времени и пространственных координат, характеризуемых вектором  $\mathbf{r}$  [3],

$$\mathbf{E} = \frac{Z_0}{4\pi} \left[ \frac{1}{cr} \left( \frac{(\ddot{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r}}{r^2} - \ddot{\mathbf{p}} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{3 \cdot (\dot{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r}}{r^2} - \dot{\mathbf{p}} \right) + \frac{c}{r^3} \left( \frac{3 \cdot (\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r}}{r^2} - \mathbf{p} \right) \right], \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{1}{cr} \frac{\ddot{\mathbf{p}} \times \mathbf{r}}{r} + \frac{1}{r^2} \frac{\dot{\mathbf{p}} \times \mathbf{r}}{r} \right]. \quad (2)$$

Здесь через  $\dot{\mathbf{p}}$  – обозначены первая и  $\ddot{\mathbf{p}}$  – вторая производные вектора дипольного момента по времени, определяемые соотношениями

$$\mathbf{p} = q(t) \cdot \mathbf{s}, \quad \dot{\mathbf{p}} = \frac{d}{dt} \mathbf{p} = i(t) \cdot \mathbf{s}, \quad \ddot{\mathbf{p}} = \frac{d}{dt} i(t) \cdot \mathbf{s}, \quad (3)$$

где  $i(t)$  – электрический ток, протекающий через диполь,  $q(t)$  – изменение величины заряда,  $\mathbf{s}$  – вектор, характеризующий размеры диполя  $s$  и направление движения тока (рис. 2).

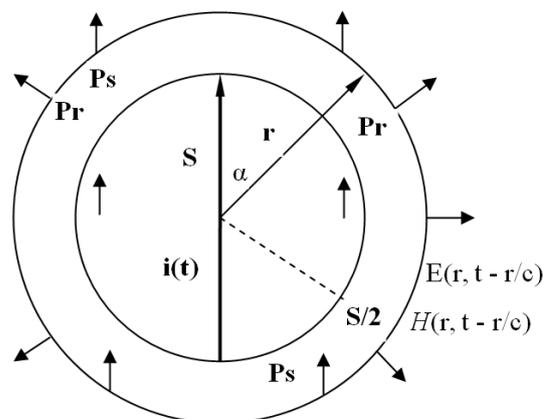


Рис. 2. Схема электрического диполя Герца

При этом вектор Пойнтинга определяется формулой

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = Z_0 \left( \frac{s}{4\pi} \right)^2 \left\{ \frac{1}{c^2 r^2} \left( \frac{di}{dt} \right)^2 \sin^2 \alpha \frac{\mathbf{r}}{r} + \right. \\ \left. + \frac{2}{cr^3} i \frac{di}{dt} \left( \sin^2 \alpha \frac{\mathbf{r}}{r} + \sin \alpha \frac{\mathbf{s}}{s} \right) + \right. \\ \left. + \left[ \frac{1}{r^4} \left( i^2 + \frac{di}{dt} \int i dt \right) + \frac{c}{r^5} i \int i dt \right] \times \right. \\ \left. \times \left( \sin^2 \alpha \frac{\mathbf{r}}{r} + 2 \sin \alpha \frac{\mathbf{s}}{s} \right) \right\}, \quad (4)$$

а мощность, протекающая в единицу времени через сферу радиуса  $r$ , выражением

$$P_m = Z_0 \left( \frac{s^2}{6\pi \cdot c^2} \right) \left\{ \left( \frac{di}{dt} \right)^2 + \frac{2}{cr} i \frac{di}{dt} + \right. \\ \left. + \left[ \frac{c^2}{r^2} \left( i^2 + \frac{di}{dt} \int i dt \right) + \frac{c^3}{r^3} i \int i dt \right] \right\}. \quad (5)$$

С использованием данного метода были определены пространственно-временные и энергетические уровни компонент ЭМП на различных удалениях  $r$  от USB-интерфейсов, а с помощью быстрого преобразования Фурье получены спектры распределения мощности в ближней, промежуточной и дальней зонах наблюдения для трех типовых режимов USB.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ КОМПОНЕНТ ЭМП И ИХ СПЕКТРОВ

На рис. 3 представлены спектральные  $P_m = P(f)$  и временные  $P_m = P(t)$  характеристики потока мощности ЭМП от совокупности импульсов ( $N = 100$ ) и их фронтов, протекающих через сферу радиуса  $r = 1000$  м от USB-интерфейса, работающего с медленной (LS) скоростью передачи данных  $V = 1,5$  Мб/с. Расчеты проведены для следующих параметров USB: длительность импульсов  $\tau = 6,67 \cdot 10^{-7}$  с; длительность фронтов импульсов  $t_\phi = 7,5 \cdot 10^{-8}$  с; период следования импульсов  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_\phi)$ ; длина интерфейсного кабеля  $s = 1$  м; амплитуда импульса тока  $I = 10^{-3}$  А [1].

Рис. 4 и 5 отражают спектральные  $P_m = P(f)$  и временные  $P_m = P(t)$  характеристики потока мощности ЭМП от USB-интерфейса ( $V = 1,5$  Мб/с) на удалениях  $r = 100$  м и 10 м, соответственно. Исходные данные USB сигналов соответствуют случаю рис. 3.

На рис. 6 представлены спектральные  $P_m = P(f)$  и временные  $P_m = P(t)$  характеристики потока мощности ЭМП от совокупности импульсов ( $N = 100$ ) и их фронтов, протекающих через сферу радиуса  $r = 1000$  м от USB-интерфейса, работающего с полной (FS) скоростью передачи данных  $V = 12$  Мб/с. Расчеты проведены для следующих параметров USB: длительность импульсов  $\tau = 8 \cdot 10^{-8}$  с; длительность фронтов импульсов  $t_\phi = 5 \cdot 10^{-9}$  с; период следования импульсов  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_\phi)$ ; длина интерфейсного кабеля  $s = 1$  м; амплитуда импульса тока  $I = 10^{-3}$  А [1].

Приведенные на рис. 7 спектральные  $P_m = P(f)$  и временные  $P_m = P(t)$  характеристики потока мощности ЭМП соответствуют удалению от USB излучателя на 1 м и режиму передачи данных  $V = 12$  Мб/с при  $\tau = 8 \cdot 10^{-8}$  с,  $t_\phi = 5 \cdot 10^{-9}$  с,  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_\phi)$ ,  $I = 10^{-3}$  А. Спектральные характеристики потока мощности ЭМП от передних и задних фронтов импульсов отражает рис. 8.

Рис. 9 и 10 отражают спектральные  $P_m = P(f)$  и временные  $P_m = P(t)$  характеристики потока мощности ЭМП от USB-интерфейса с высокой (HS) скоростью передачи ( $V = 480$  Мб/с) на удалениях  $r = 1000$  м и 1 м, соответственно. Расчеты проведены при  $\tau = 2,1 \cdot 10^{-9}$  с,  $t_\phi = 5 \cdot 10^{-10}$  с,  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_\phi)$ ,  $I = 10^{-3}$  А [1].

Для сравнительного анализа на всех указанных рисунках приводятся спектры одиночного видеоимпульса длительностью  $\tau$  и спектры потока мощности ЭМП от последовательности передних и задних фронтов USB сигналов ( $t_\phi$ ).

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. В режиме медленной скорости передачи данных (LS) по каналам USB (рис. 3–5) частоты первого ( $f_1$ ), второго ( $f_2$ ) и последующих нулей ( $f_k$ ) огибающей линейчатого спектра потока мощности ЭМП на удалении от источника излучения  $r > 50$  м определяются не длительностью вершин импульсов  $\tau$ , а длительностью фронтов импульсной последовательности  $t_\phi$  и составляют  $f_1 = (1/t_\phi) = 13,3$  МГц,  $f_2 = (2/t_\phi) = 26,6$

МГц,  $f_k = (k/t_\phi)$  МГц, что на порядок превышает ширину лепестков огибающей спектра обычной последовательности импульсов с аналогичными параметрами ( $f_1 = 1,35$  МГц). Частотный разнос гармоник линейчатого спектра для LOW составляет 0,6 МГц.

2. В режиме полной скорости передачи данных (FS) по каналам USB (рис. 6–8) частоты первого ( $f_1$ ), второго ( $f_2$ ) и последующих нулей ( $f_k$ ) огибающей линейчатого спектра потока мощности ЭМП на удалении от источника излучения  $r > 10$  м определяются не длительностью вершин импульсов  $\tau$ , а длительностью фронтов импульсной последовательности  $t_\phi$  и составляют  $f_1 = (1/t_\phi) = 200$  МГц,  $f_2 = (2/t_\phi) = 400$  МГц,  $f_k = (k/t_\phi)$  МГц, что в 16 раз превышает ширину лепестков огибающей спектра обычной последовательности импульсов с аналогичными параметрами ( $f_1 = 11,8$  МГц). Частотный разнос гармоник линейчатого спектра для FS составляет 5,5 МГц.

3. В режиме высокой скорости передачи данных (HS) по каналам USB (рис. 9–10) частоты первого ( $f_1$ ), второго ( $f_2$ ) и последующих нулей ( $f_k$ ) огибающей линейчатого спектра потока мощности ЭМП на удалении от источника излучения  $r > 1-2$  м определяются не длительностью вершин импульсов  $\tau$ , а дли-

тельностью фронтов импульсной последовательности  $t_\phi$  и составляют  $f_1 = (1/t_\phi) = 2000$  МГц,  $f_2 = (2/t_\phi) = 4000$  МГц,  $f_k = (k/t_\phi)$  МГц, что 5,2 раз превышает ширину лепестков огибающей спектра обычной последовательности импульсов с аналогичными параметрами ( $f_1 = 385$  МГц). Частотный разнос гармоник линейчатого спектра для HS составляет 162 МГц.

4. При удалениях от источника излучений  $r < 50$  50 м для скорости  $V = 1,5$  Мб/с,  $r < 10$  м для скорости  $V = 12$  Мб/с и  $r < 1$  м для скорости  $V = 480$  Мб/с линейчатый спектр потока мощности ЭМП сосредоточен в области полосы частот  $1/t_\phi$ .

5. Анализ временных зависимостей показывает, что при протекании несинусоидальных токов в элементарных излучателях (в том числе и в USB каналах) форма ЭМП в различных точках пространства существенно отличается от формы токов, их порождающих, чего нельзя сказать о синусоидальных токах, которые всегда порождают только синусоидальные поля. Объясняется это тем, что у цифровых сигналов имеются несколько дополнительных степеней свободы: скважность, скорость нарастания фронтов и их форма.

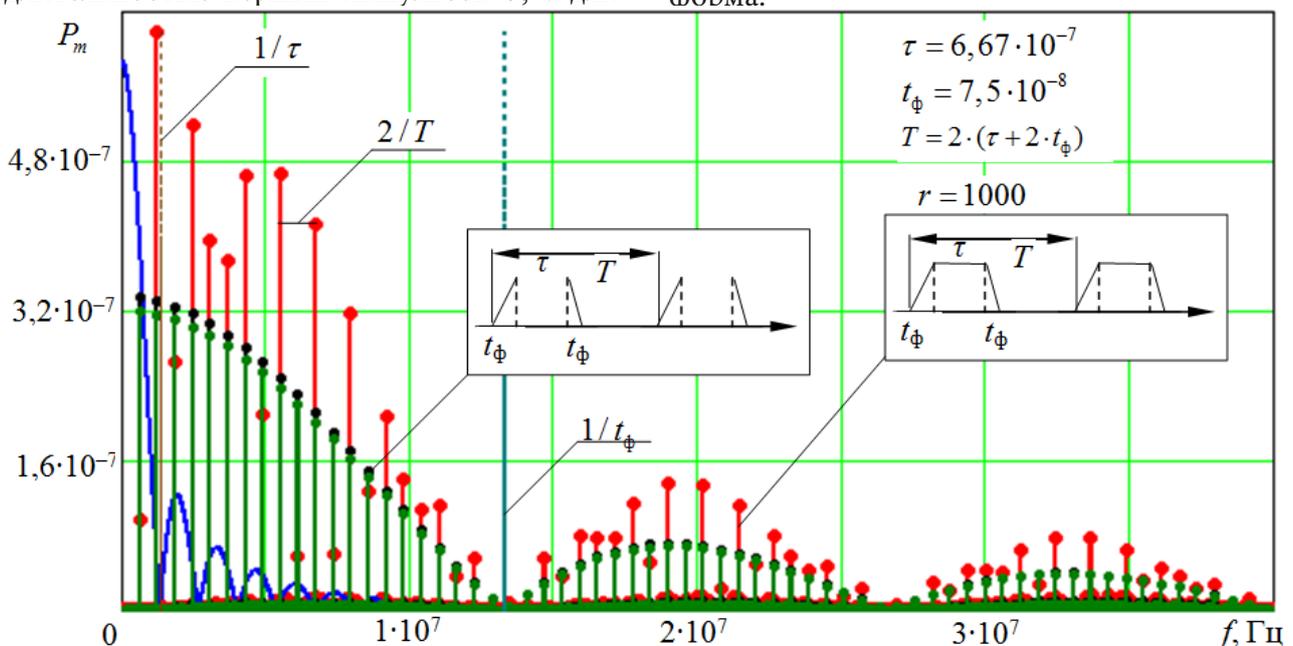


Рис. 3а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от совокупности импульсов и фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r = 1000$  м, для  $N = 100$  импульсов с параметрами:  $\tau = 6,67 \cdot 10^{-7}$ ;  $t_\phi = 7,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_\phi)$

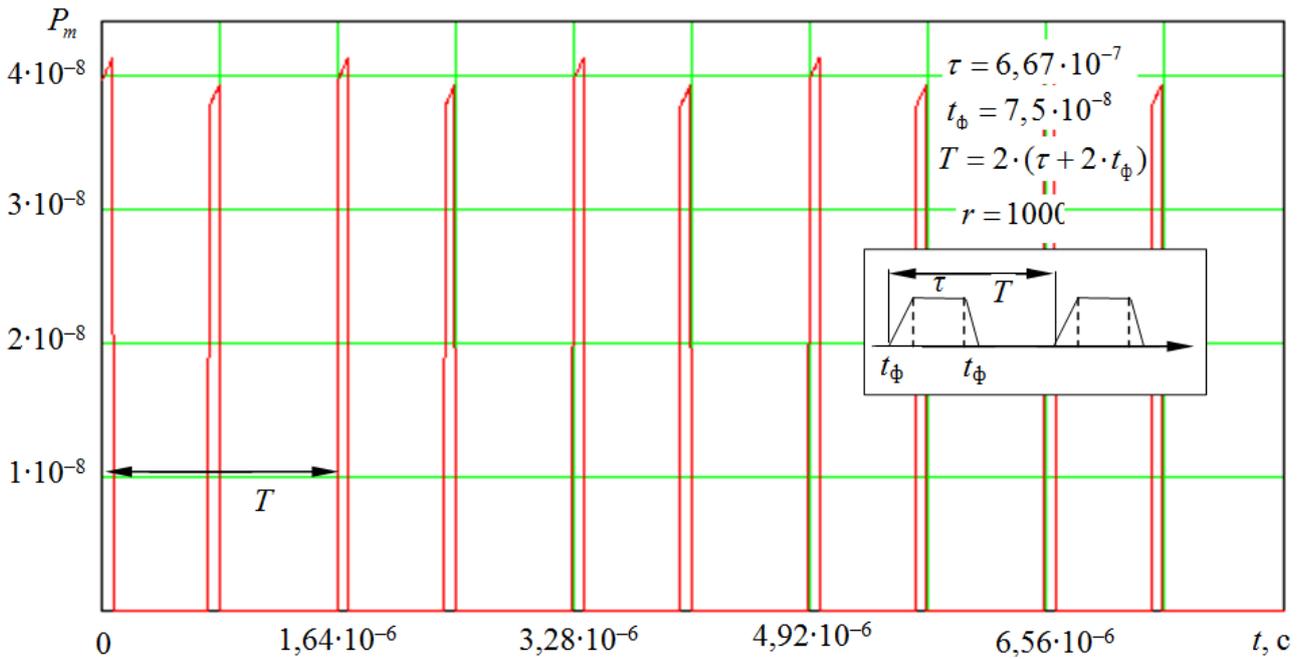


Рис. 36. Временные зависимости мгновенных значений потока мощности электромагнитного поля, протекающего через сферу радиуса  $r = 1000$  м, для последовательности из  $N = 5$  импульсов с параметрами:  $\tau = 6,67 \cdot 10^{-7}$ ;  $t_{\phi} = 7,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

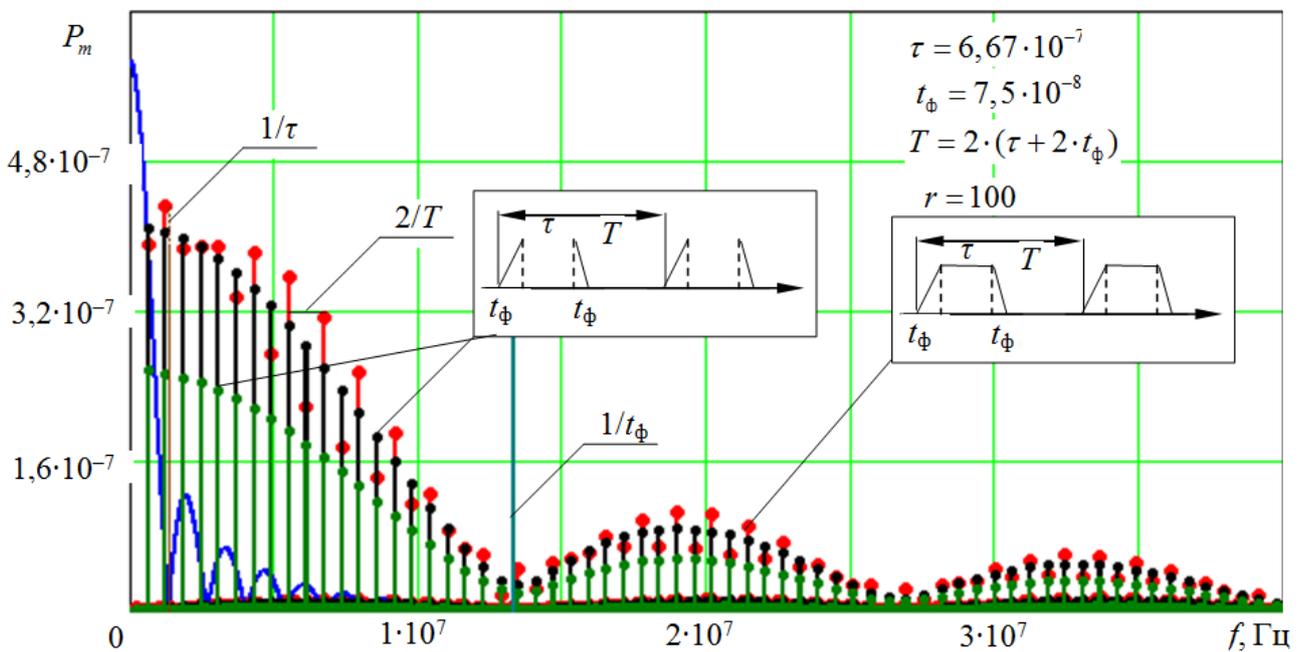


Рис. 4а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от совокупности импульсов и фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r = 100$  м, для  $N = 100$  импульсов с параметрами:  $\tau = 6,67 \cdot 10^{-7}$ ;  $t_{\phi} = 7,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

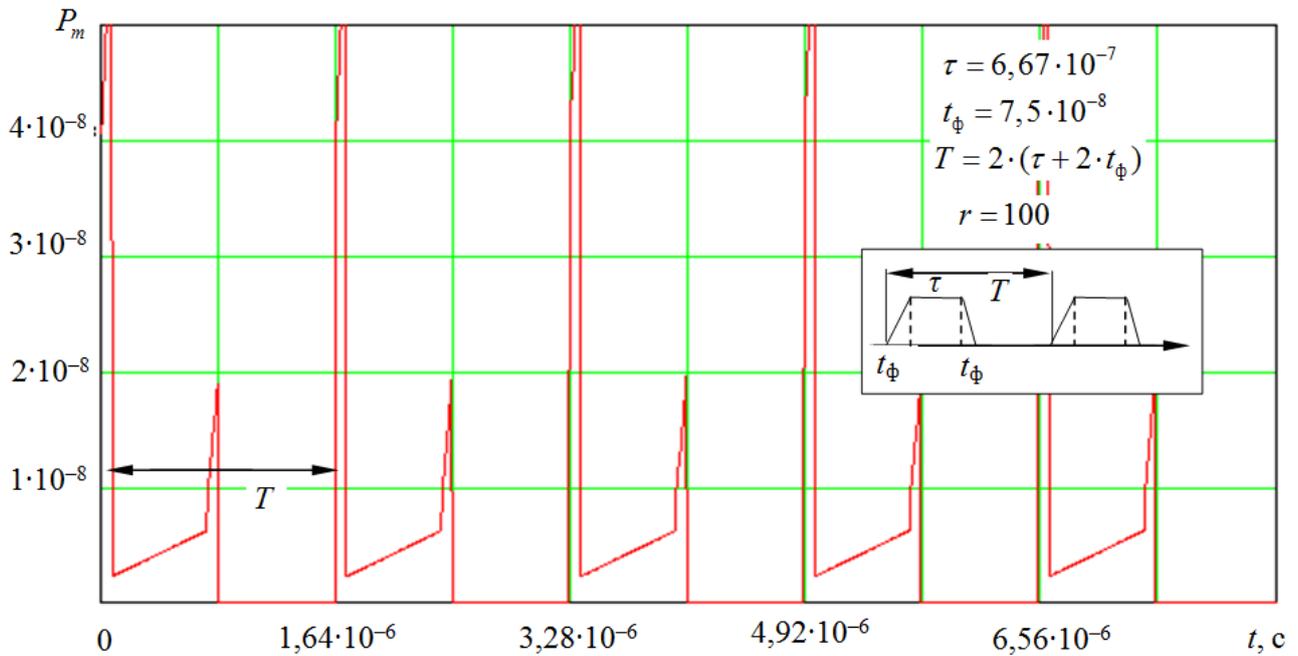


Рис. 4б. Временные зависимости мгновенных значений потока мощности электромагнитного поля, протекающего через сферу радиуса  $r = 100$  м, для последовательности из  $N = 5$  импульсов с параметрами:  $\tau = 6,67 \cdot 10^{-7}$ ;  $t_{\phi} = 7,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

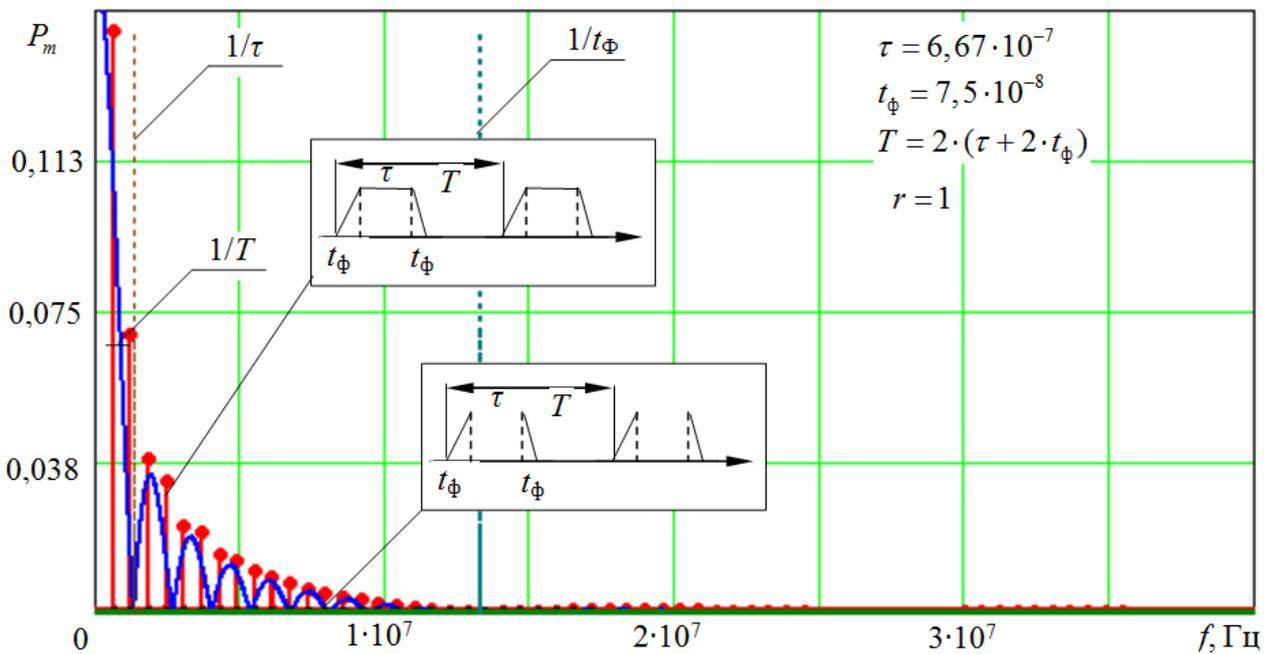


Рис. 5а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от совокупности импульсов и фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r = 1$  м, для  $N = 100$  импульсов с параметрами:  $\tau = 6,67 \cdot 10^{-7}$ ;  $t_{\phi} = 7,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

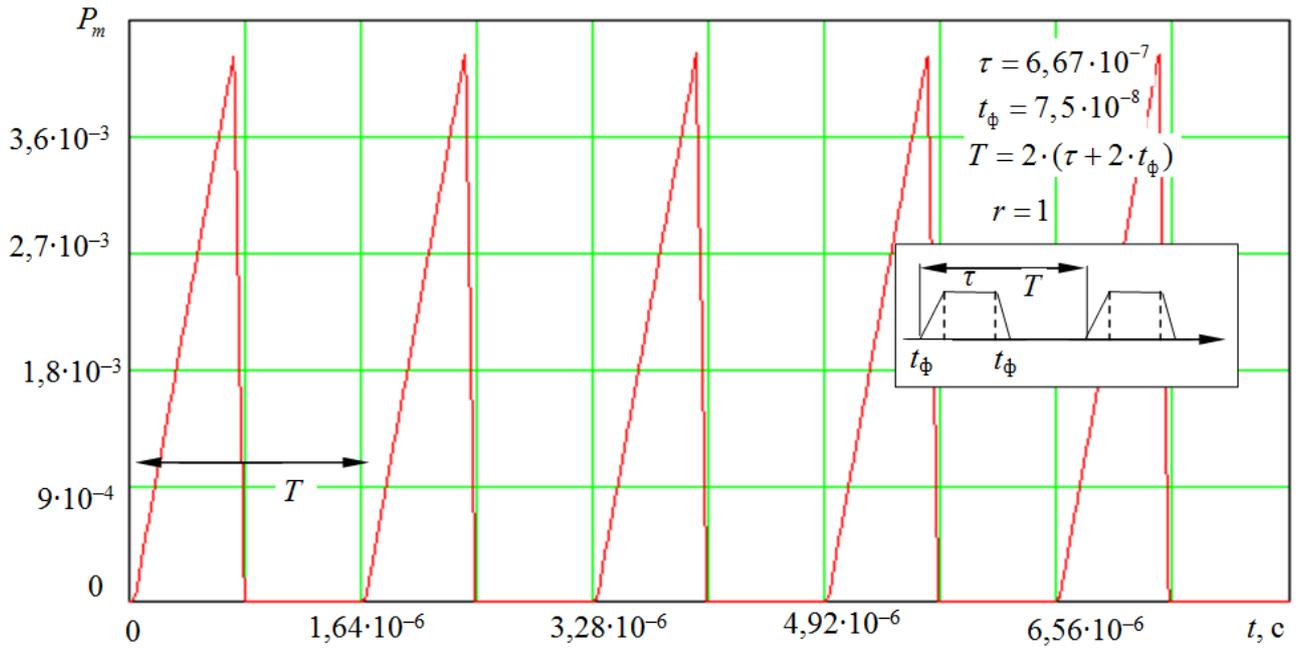


Рис. 5б. Временные зависимости мгновенных значений потока мощности электромагнитного поля, протекающего через сферу радиуса  $r = 1$  м, для последовательности из  $N = 5$  импульсов с параметрами:  $\tau = 6,67 \cdot 10^{-7}$ ;  $t_{\phi} = 7,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

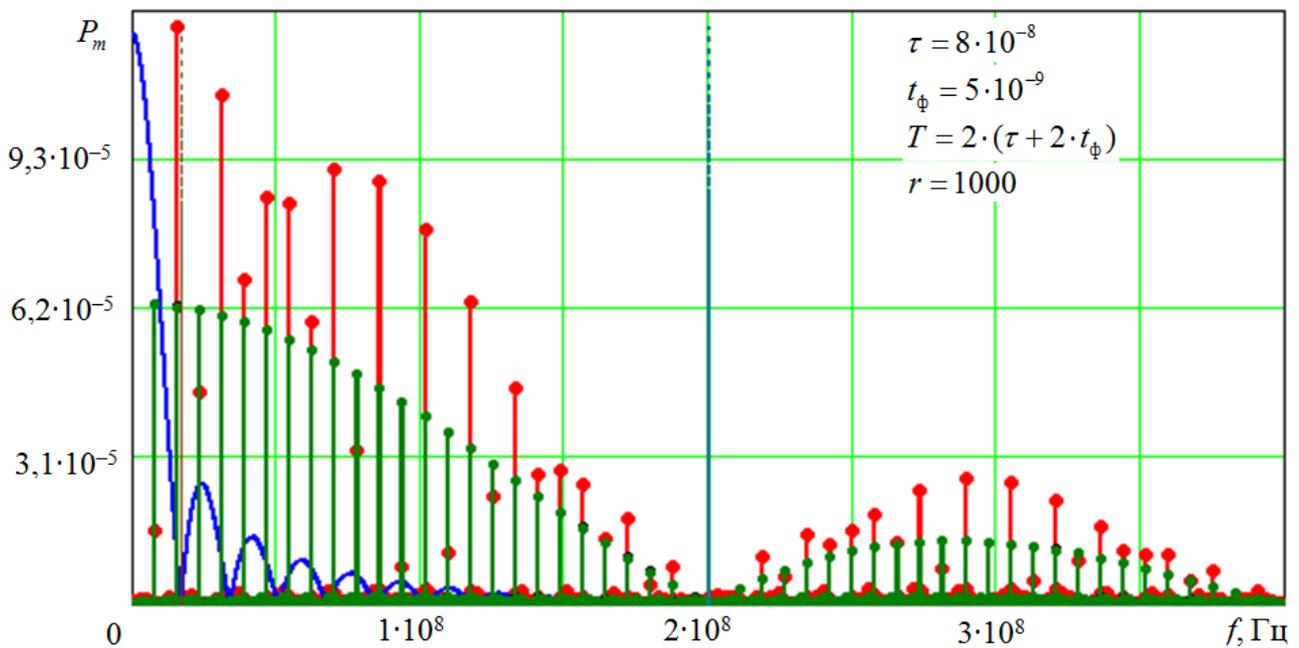


Рис. 6а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от совокупности импульсов и фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r = 1000$  м, для  $N = 100$  импульсов с параметрами:  $\tau = 8 \cdot 10^{-8}$ ;  $t_{\phi} = 5 \cdot 10^{-9}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

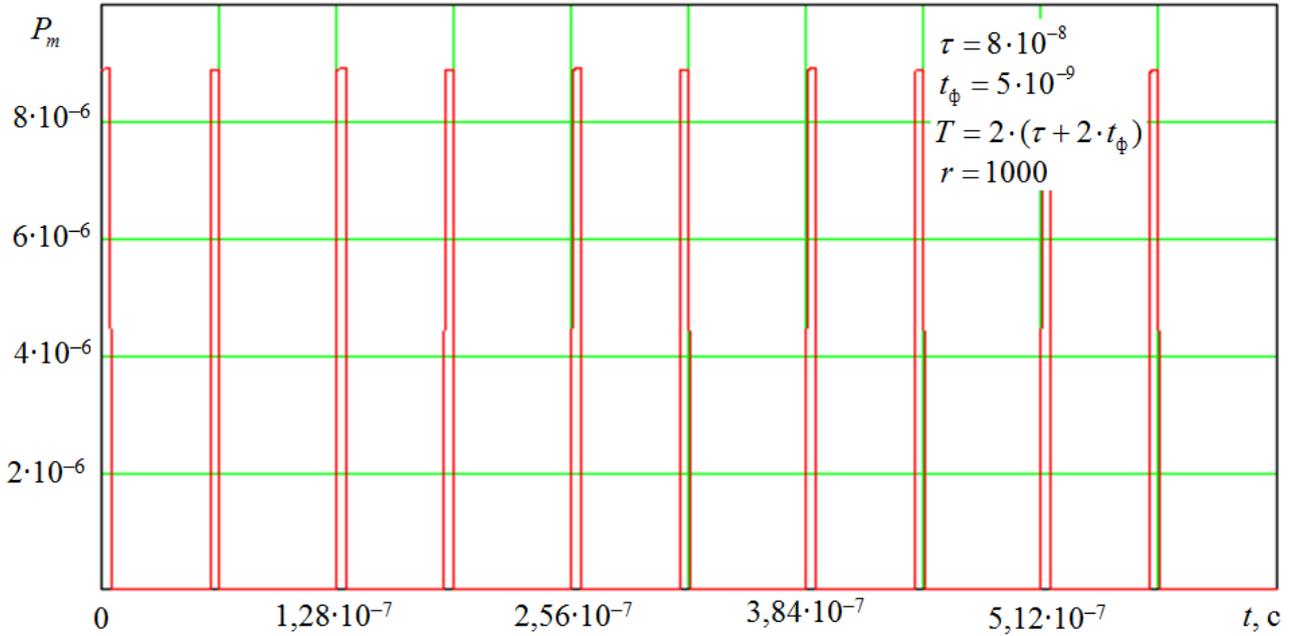


Рис. 6б. Временные зависимости мгновенных значений потока мощности электромагнитного поля, протекающего через сферу радиуса  $r = 1000$  м, для последовательности из  $N = 100$  импульсов с параметрами:  $\tau = 8 \cdot 10^{-8}$ ;  $t_{\phi} = 5 \cdot 10^{-9}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

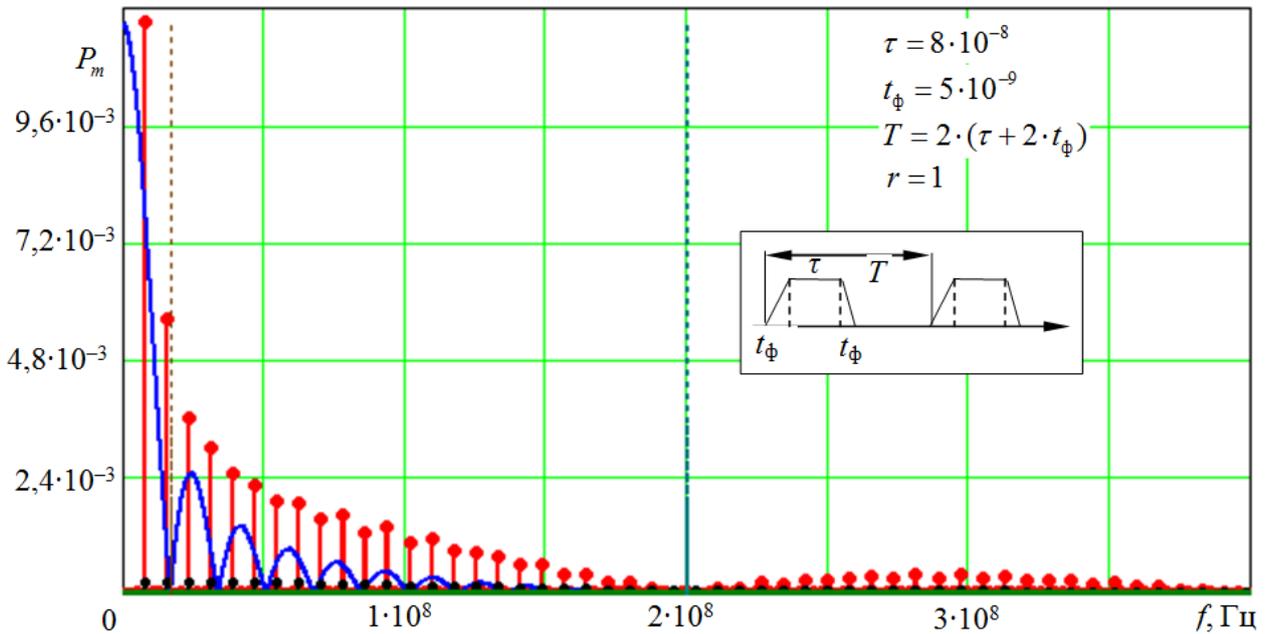


Рис. 7а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от совокупности импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r = 1$  м, для  $N = 100$  импульсов с параметрами:  $\tau = 8 \cdot 10^{-8}$ ;  $t_{\phi} = 5 \cdot 10^{-9}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

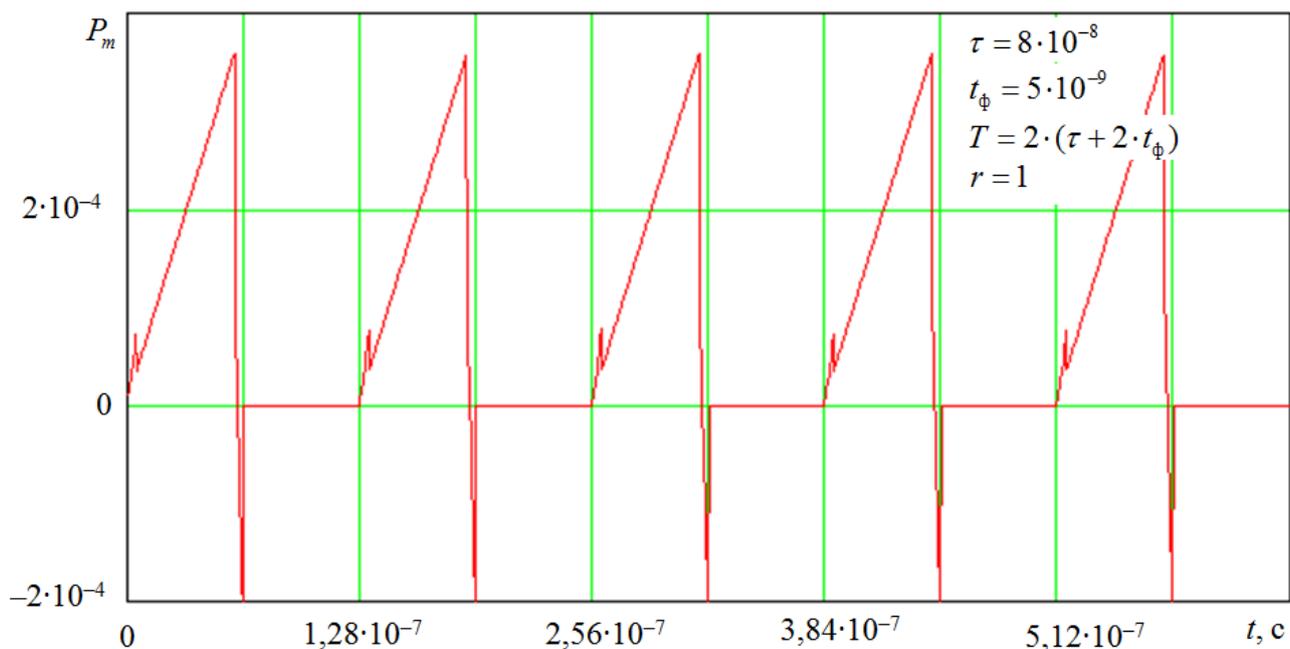


Рис. 7б. Временные зависимости мгновенных значений потока мощности электромагнитного поля, протекающего через сферу радиуса  $r=1$  м, для последовательности из  $N=5$  импульсов с параметрами:  $\tau=8\cdot 10^{-8}$ ;  $t_{\phi}=5\cdot 10^{-9}$ ;  $T=2\cdot(\tau+2\cdot t_{\phi})$

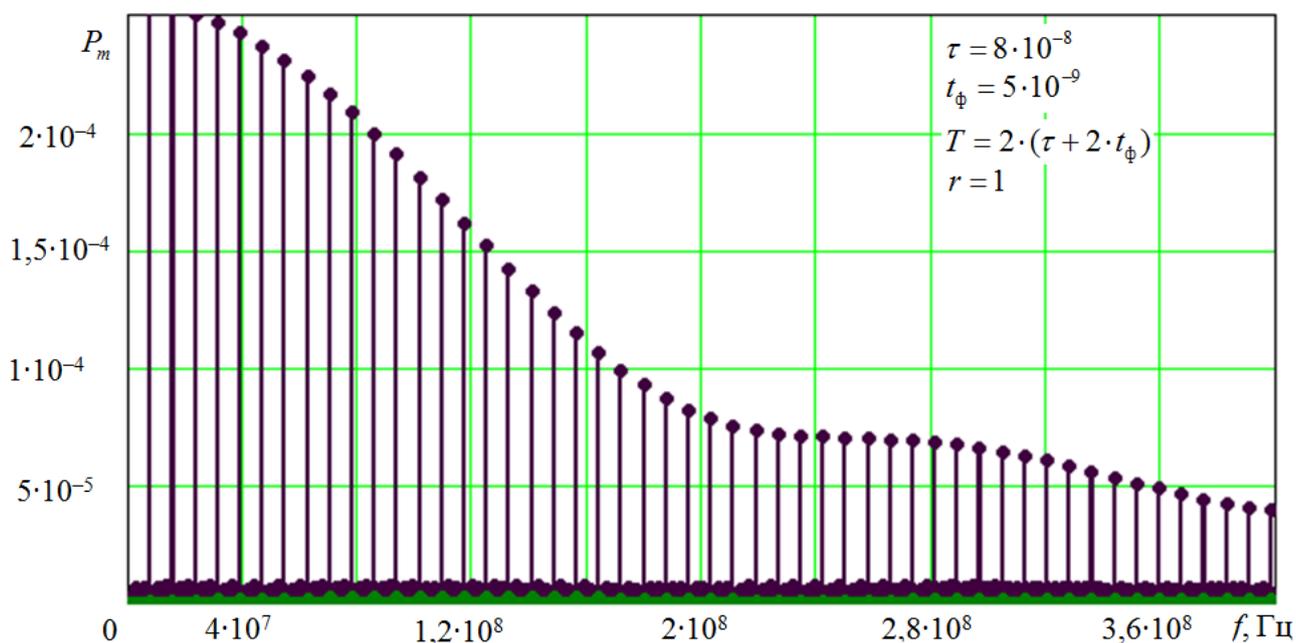


Рис. 8а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от передних фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r=1$  м, для  $N=100$  импульсов с параметрами:  $\tau=8\cdot 10^{-8}$ ;  $t_{\phi}=5\cdot 10^{-9}$ ;  $T=2\cdot(\tau+2\cdot t_{\phi})$

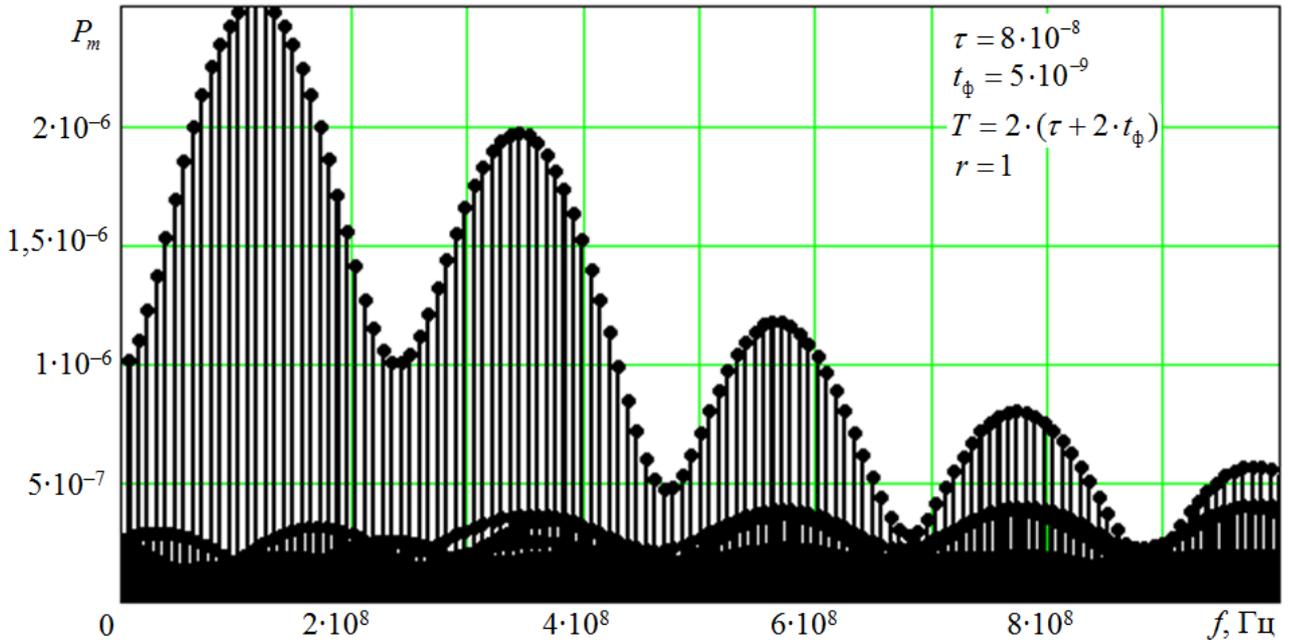


Рис. 8б. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от задних фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r=1$  м, для  $N=100$  импульсов с параметрами:  $\tau=8\cdot 10^{-8}$ ;  $t_{\phi}=5\cdot 10^{-9}$ ;  $T=2\cdot(\tau+2\cdot t_{\phi})$

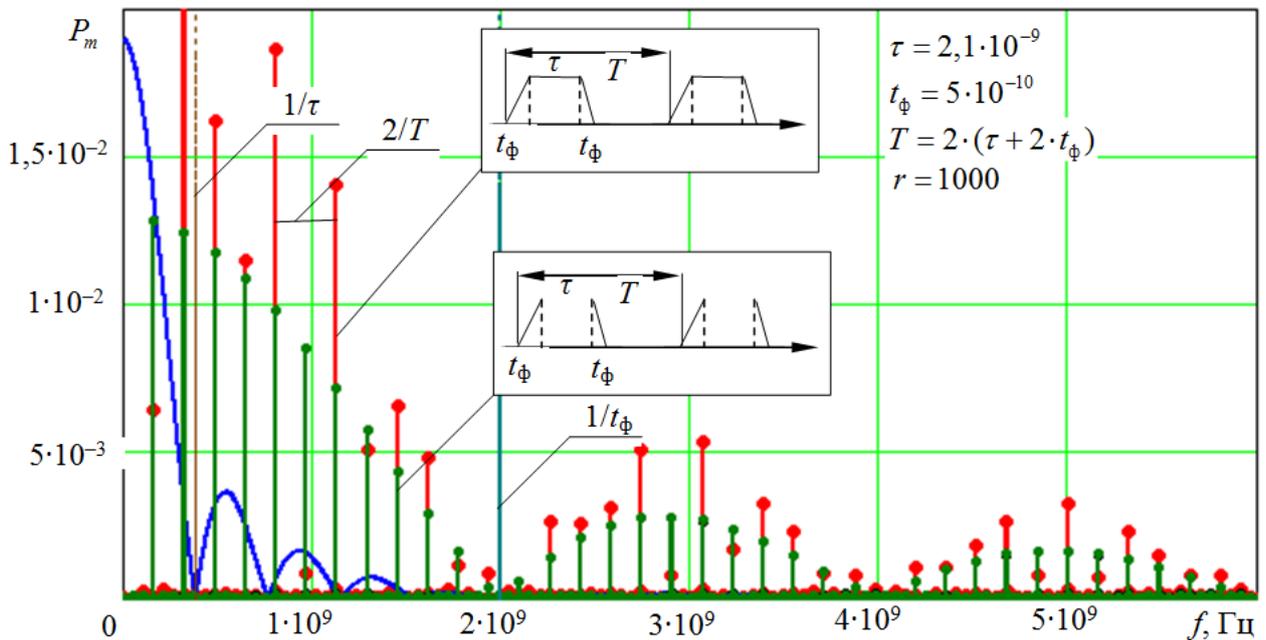


Рис. 9а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от совокупности импульсов и фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r=1000$  м, для  $N=100$  импульсов с параметрами:  $\tau=2,1\cdot 10^{-9}$ ;  $t_{\phi}=5\cdot 10^{-10}$ ;  $T=2\cdot(\tau+2\cdot t_{\phi})$

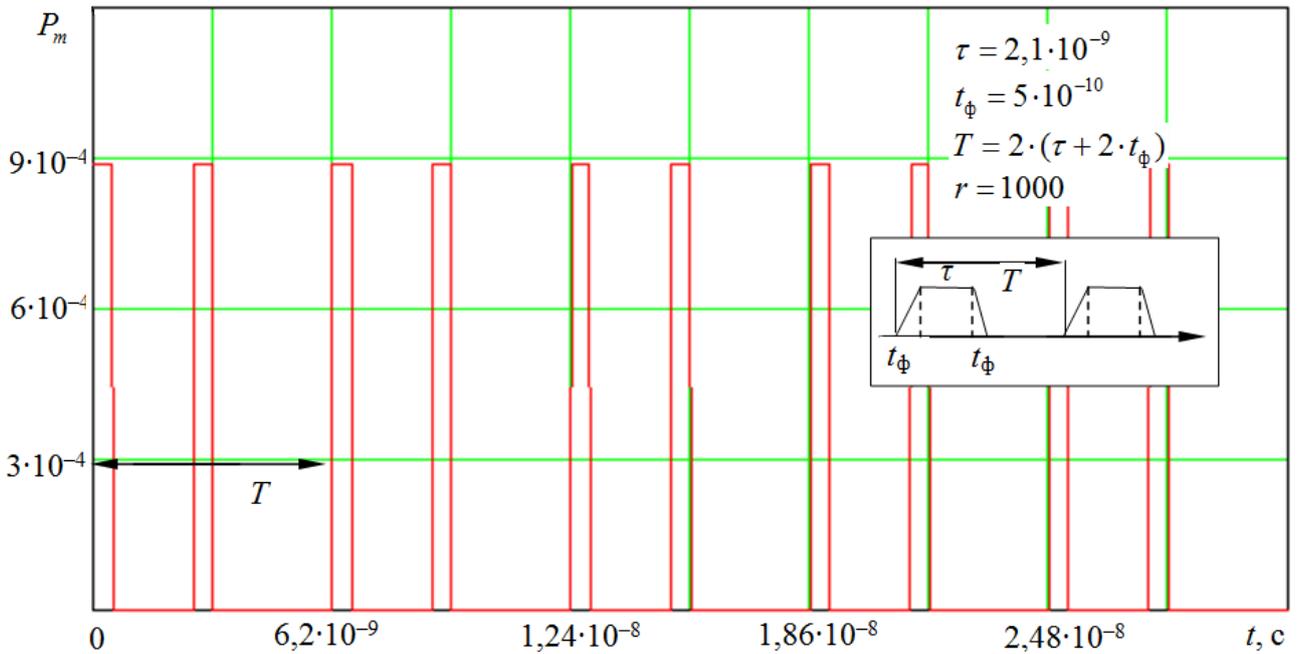


Рис. 9б. Временные зависимости мгновенных значений потока мощности электромагнитного поля, протекающего через сферу радиуса  $r = 1000$  м, для последовательности из  $N = 5$  импульсов с параметрами:  $\tau = 2,1 \cdot 10^{-9}$ ;  $t_{\phi} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

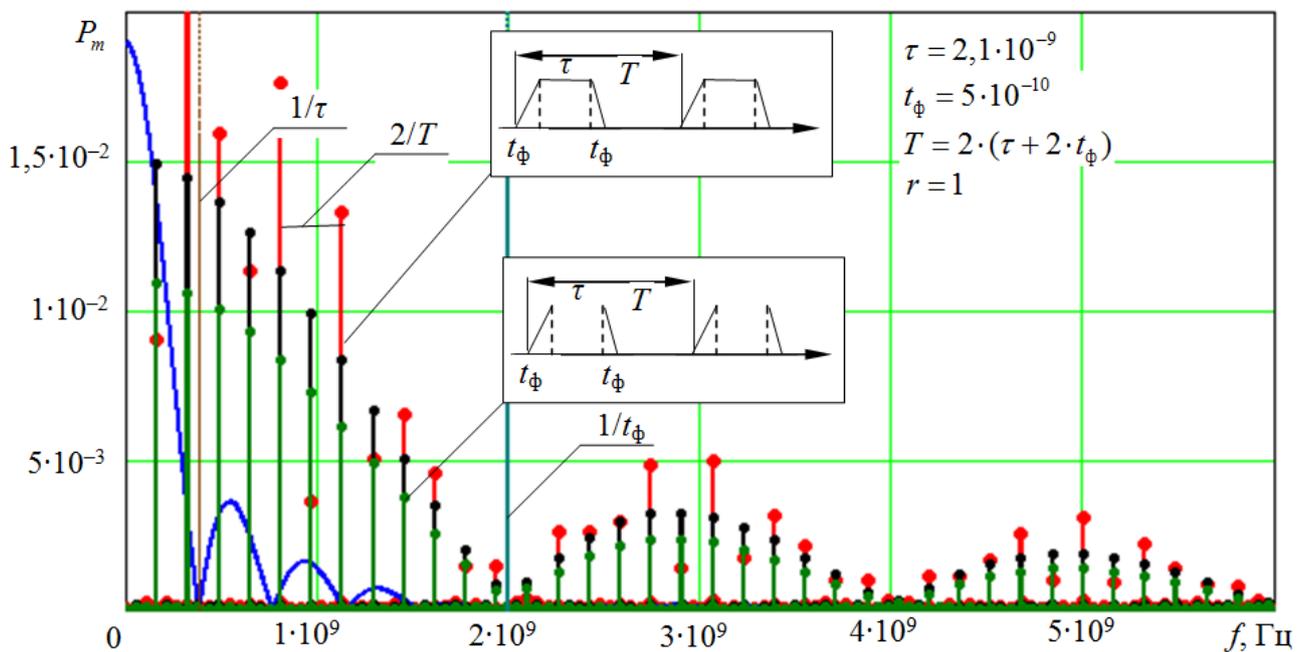


Рис. 10а. Спектральные характеристики потока мощности электромагнитного поля от совокупности импульсов и фронтов импульсов, протекающего через сферу радиуса  $r = 1$  м, для  $N = 100$  импульсов с параметрами:  $\tau = 2,1 \cdot 10^{-9}$ ;  $t_{\phi} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

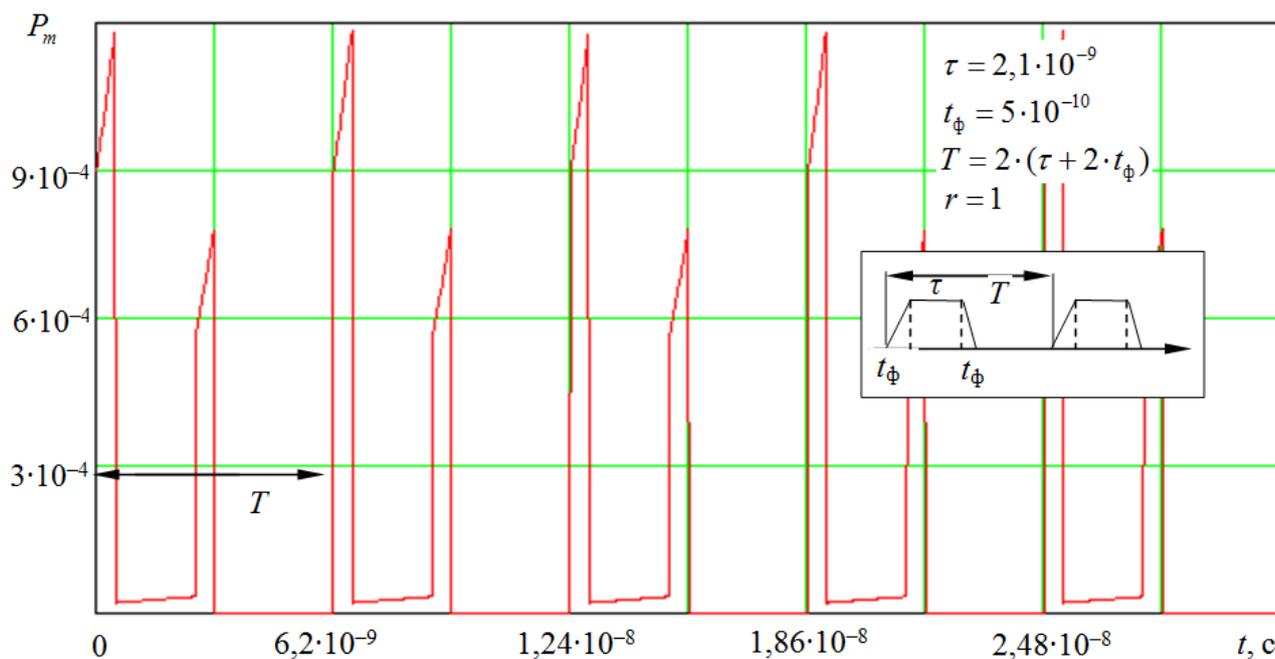


Рис. 10б. Временные зависимости мгновенных значений потока мощности электромагнитного поля, протекающего через сферу радиуса  $r = 1$  м, для последовательности из  $N = 5$  импульсов с параметрами:  $\tau = 2,1 \cdot 10^{-9}$ ;  $t_{\phi} = 5 \cdot 10^{-10}$ ;  $T = 2 \cdot (\tau + 2 \cdot t_{\phi})$

## ВЫВОДЫ

1. При протекании импульсных (несинусоидальных) токов в USB-интерфейсах потоки мощности ЭМП в дальней и ближней зонах побочного электромагнитного излучения существенно отличаются не только по величине, но и по форме, что принципиально невозможно для полей синусоидальной формы.

2. Потоки излучаемой мощности ЭМП побочных излучений от USB-интерфейсов зависят от величины тока, протекающего в излучающем проводнике, скорости его изменения во времени и интеграла по времени от величины тока в излучателе.

3. Численные значения потока ЭМП побочных излучений в дальней зоне определяются первой производной от изменения тока (т. е. зависят от фронтов импульсных токов, протекающих в USB-интерфейсах), а на величину потока ЭМП в промежуточной и ближней зонах значительное влияние оказывает величина самого тока в излучателе и величина интеграла от тока по времени. Это обстоятельство важно учитывать при выборе точки измерений при определении уровней излучений USB-интерфейсов.

Таким образом, разработанный в статье методический подход позволяет проводить теоретическую оценку уровней потоков мощности ЭМП в канале побочных электромагнитных излучений от USB-интерфейсов при различных скоростях передачи данных в интересах проведения более точных и достоверных измерений при обеспечении защиты обрабатываемой компьютерной техникой информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Universal Serial Bus, Revision 2,0, April 27, 2000. – 570 с.
2. Гук М. Ю. Шины PCI, USB и FireWire. Энциклопедия. – СПб. : Питер, 2005. – 540 с.
3. Хармут Х. Теория секвентного анализа. Перевод с англ. – М. : Мир, 1980. – 575 с.
4. Иванов С. М., Коровин Н. А., Мильников В. А, Назарьева И. Н, Тупота В. И. Анализ особенностей затухания несинусоидального электромагнитного поля в интересах оценки защищенности информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений // Телекоммуникации. – 2008. – № 9. – с. 36–43.

5. Иванов С. М., Коровин Н. А., Назарьева И.Н, Тупота В. И. Анализ спектральных характеристик побочных электромагнитных излучений, формируемых импульсными токами // Телекоммуникации. – 2010. – № 11. – с. 35–41.

**Гончаров Игорь Васильевич** – генеральный директор ЗАО НПО «Инфобезопасность», кандидат технических наук, доцент. E-mail: goncharov@infobez.org

**Коровин Николай Александрович** – к.т.н., ЗАО НПО «Инфобезопасность». Тел. (473) 233-13-28

**Гончаров Никита Игоревич** – студент Воронежского государственного технического университета. E-mail: nikigoncharov@ya.ru

6. Вялых А. С., Вялых С. А., Сирота А.А. Нейросетевой алгоритм обработки информации для прогнозирования надёжности программного обеспечения // Вестник ВГУ «Системный анализ и информационные технологии». – 2013. – № 2. – с. 140–143.

**Goncharov I. V.** – director general of Closed Joint Stock Company Scientific production association Infobezопасnost, Candidate of Technical Sciences, associate professor. E-mail: goncharov@infobez.org

**Korovin N. A.** – Candidate of Technical Sciences, Closed Joint Stock Company Scientific production association Infobezопасnost. Tel. (473) 233-13-28

**Goncharov N. I.** – student of Voronezh State Technical University. E-mail: nikigoncharov@ya.ru