

**Влияние параметров сверхкороткоимпульсного  
электромагнитного излучения на функционирование  
радиоэлектронных средств**

**Боев С.Ф.<sup>1\*</sup>, Пименов П.Н.<sup>2\*\*</sup>, Пронин С.А.<sup>2\*\*\*</sup>, Шевырев А.В.<sup>2\*\*\*\*</sup>**

*<sup>1</sup>Группа компаний «РТИ»,*

*ул. 8-го Марта, 10, стр. 1, Москва, 127083, Россия*

*<sup>2</sup>Московский научно-исследовательский радиотехнический институт,*

*Большой Трехсвятительский пер., 2/1, Москва, 101000, Россия*

*\*e-mail: boev@oaorti.ru*

*\*\*e-mail: pimenov-p@yandex.com*

*\*\*\*e-mail: ukjam89@gmail.com*

*\*\*\*\*e-mail: astra@mnirti.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены механизм влияния излучения на радиоэлектронные средства, каналы влияния; определены ключевые параметры излучения. Выявлена зависимость степени влияния излучения от временных параметров излучения, при неизменной энергетике поля.

**Ключевые слова:** сверхкороткоимпульсное электромагнитное излучение, электромагнитное воздействие, последовательность импульсов, эффективность влияния.

## **Введение**

Интенсивное развитие радиоэлектронных устройств (РЭС), устройств обработки информации, входящих в состав роботизированных и др. комплексов, и их ключевая значимость в различных областях, а также совершенствование средств преднамеренного электромагнитного воздействия, приводят к необходимости рассмотрения вопроса защиты и устойчивого функционирования этих устройств при воздействии новых видов электромагнитного излучения.

### **Сверхкороткоимпульсное электромагнитное излучение**

Это относительно новый вид электромагнитного излучения неприродного происхождения с длительностью импульса значительно меньшей длительности электромагнитного излучения (ЭМИ) удара молнии и незначительно меньшей длительности ЭМИ ядерного взрыва. Сверхкороткоимпульсное электромагнитное излучение (СКИ ЭМИ) характеризуется длительностью импульса менее 10 нс. Такая особенность дает СКИ ЭМИ ряд новых свойств. Ввиду большой крутизны фронта такого импульса, в пространстве формируется помеха с шириной спектра до нескольких ГГц. Известно, что такой импульс наиболее опасен из-за высокой проникающей способности вследствие непрерывного заполнения спектра. Первые источники импульсов СКИ ЭМИ были основаны на мощных искровых разрядниках, к настоящему моменту современные генераторы строятся на высокоскоростных полупроводниковых ключах [3].

Применение высокоскоростных полупроводниковых ключей позволило уменьшить длительности излучаемых импульсов до 0,15 нс с закономерным расширением ширины спектра образующейся помехи, обеспечить высокую повторяемость характеристик генерируемых импульсов с возможностью точно задавать интервалы между ними.

Импульсы СКИ ЭМИ могут быть как одиночными, так и следовать с некоторой частотой повторения, а также представлять собой более сложные последовательности. Важными параметрами исследуемого излучения являются напряженность электрического поля и количество импульсов в единицу времени, а параметрами, определяющими характер влияния, могут быть временные характеристики импульсов.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие информационно-телекоммуникационных систем. Увеличение быстродействия таких систем осуществляется за счет их миниатюризации и, как следствие, снижения уровня энергопотребления. Растут аппаратные тактовые частоты, а длительности битовых импульсов при этом снижаются.

Увеличение объемов передаваемой информации требует использования широкой полосы спектра сигналов, передаваемых как по радиоканалу, так и с использованием проводных технологий.

СКИ ЭМИ может оказывать значительное влияние на работу современных устройств с длительностями информационных импульсов сопоставимыми с длительностями импульсов СКИ ЭМИ, а также на большинство современных устройств беспроводной широкополосной

передачи данных из-за перекрытия спектра помехи СКИ ЭМИ с их рабочими частотами [6]. Именно этими обстоятельствами продиктовано особое внимание к исследованиям влияния СКИ ЭМИ на современные радиоэлектронные средства.

Важность исследований в области влияния СКИ ЭМИ на РЭС обусловлена потенциальной угрозой применения источников излучения в террористических целях и относительной простоты изготовления источников СКИ ЭМИ [4].

Следует отметить, что в серию международных стандартов международной электротехнической комиссии (МЭК) 61000, регламентирующих мероприятия по обеспечению устойчивости аппаратуры к воздействию электромагнитных импульсов, включен МЭК 61000-2-13, который определяет форму и спектральный состав СКИ ЭМИ [7]. Так же упоминание СКИ ЭМИ появилось и в ряде Российских стандартов одним из которых является ГОСТ Р 51317.1.5 «Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения» [1].

### **Каналы влияния СКИ ЭМИ на РЭС**

Рассмотрение влияния СКИ ЭМИ на РЭС следует проводить, основываясь на двух основных интерпретациях СКИ ЭМИ, которые можно представить, как:

- импульсная широкополосная помеха;
- всплеск электромагнитной энергии.

Это дает нам основание рассматривать возможное влияние СКИ ЭМИ через приемные тракты устройств, учитывая широкополосность спектра импульса, а также непосредственное влияние излучения на аппаратные части устройств (проводящие структуры), учитывая высокую сосредоточенную энергетику импульса.

Влияние на приемные тракты устройств обусловлено тем, что на рабочих частотах в приемные тракты попадает часть генерируемой СКИ ЭМИ широкополосной помехи, здесь сразу следует отметить то, что уровень проходящей энергии зависит от ширины рабочей полосы устройств, и влияние на РЭС с широкополосными каналами связи будет значительно выше, чем с узкополосными. Предварительную оценку можно провести, сопоставляя величины спектральных плотностей мощности перекрываемых сигналов, рисунок 1. [2]

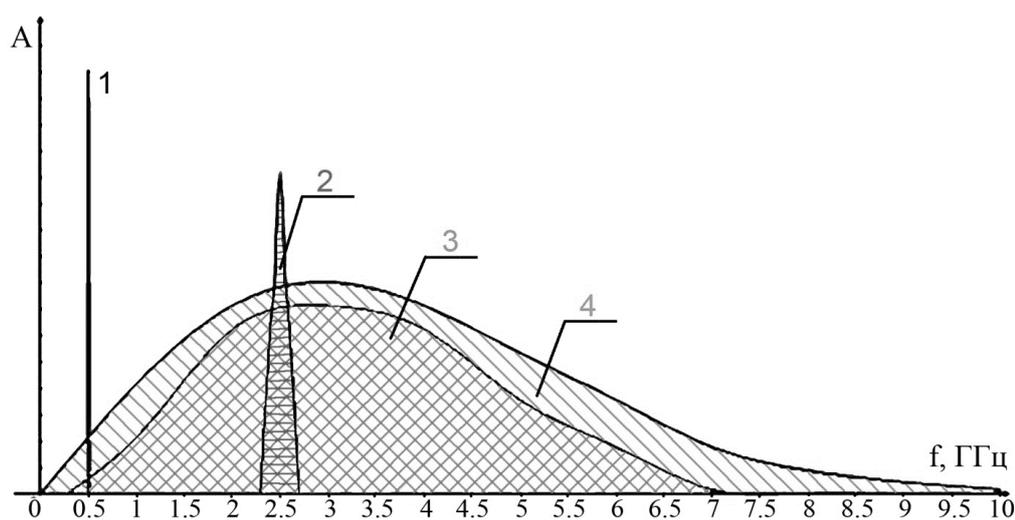


Рис. 1. Сопоставление спектров сигналов: 1 - узкополосный, 2 – широкополосный, 3 – сверхширокополосный сигналы; 4 - СКИ ЭМИ.

С другой стороны, если рассматривать СКИ ЭМИ не как широкополосную помеху, а как кратковременный всплеск электромагнитной энергии, то влияние следует рассматривать в виде непосредственного формирования в проводящих структурах наводок, схожих по длительности с импульсами СКИ ЭМИ. С учетом особенностей современных электронных устройств, призванных обрабатывать большие объемы информации с высокой скоростью, наводимые на проводящих структурах импульсы СКИ ЭМИ могут оказаться сопоставимыми с длительностями рабочих импульсов и привести к сбоям штатной работы устройств.

Таким образом, определены два основных канала влияния СКИ ЭМИ на РЭС:

- перекрытие спектра помехи с рабочим спектром приемных трактов;
- непосредственные наводки в аппаратных частях устройств.

Если рассматривать влияние СКИ ЭМИ при одинаковых условиях по этим двум направлениям, то несложно сделать заключение, что влияние на аппаратные части возможно при более высоких энергетических характеристиках СКИ ЭМИ, чем влияние через приемные тракты устройств. При этом следует отметить, что такое условие не всегда будет выполняться, к примеру, при рассмотрении влияния на устройства использующие узкополосные радиоканалы передачи информации, оно не будет выполняться из-за относительно малой энергии попадающий в приемные тракты этих устройств. Но и здесь нет полной однозначности: если рассматривать последовательность импульсов или пакеты импульсов с определенным

интервалом между ними, то картина и здесь может измениться на противоположную. Поэтому важно при оценке потенциального влияния СКИ ЭМИ на РЭС учитывать совокупность параметров СКИ ЭМИ и устройств подверженного такому влиянию.

### Определяющие параметры СКИ ЭМИ

В практике исследований импульсных сигналов принято, что основным параметром, СКИ ЭМИ, является *энергопотенциал источника* –  $FOM$ , который рассчитывается, как произведение напряженности электрического поля на расстояние, на котором оно образовано.  $FOM$  измеряется в вольтах. Другими словами, это напряженность поля на расстоянии 1 м от источника.

$$FOM = E \times r(1), \text{ где}$$

$E$  - напряженность электрического поля на расстоянии  $r$  от источника.

Кроме напряженности электрического поля важным параметром для оценки мощности излучения является количество импульсов в единицу времени. Таким образом, другой основной характеристикой СКИ ЭМИ является *частота повторения импульсов или пакетов импульсов*. Эта величина  $f_{ски}$ , наряду с  $N$ ,  $\tau$ , рисунок 2, влияет на мощность образуемого поля, исходя из которого можно оценить спектральную плотность мощности. В общем случае сопоставляя спектральные плотности мощности полезного и помехового сигнала можно оценить степень влияния.

Если рассматривать последовательность пакетов импульсов, то новым параметром, определяющим механизм влияния СКИ ЭМИ на РЭС, является

временной параметр - *межимпульсный интервал следования импульсов* в пакете  $\Delta t$ . При формировании пакетов СКИ ЭМИ с частотой следования  $f_{ски}$ , с числом импульсов в пакете равным  $N$  и межимпульсным интервалом равным  $\Delta t$ , при определенном межимпульсном интервале, могут создаваться особые условия для прохождения энергии импульса через приемные тракты устройств.

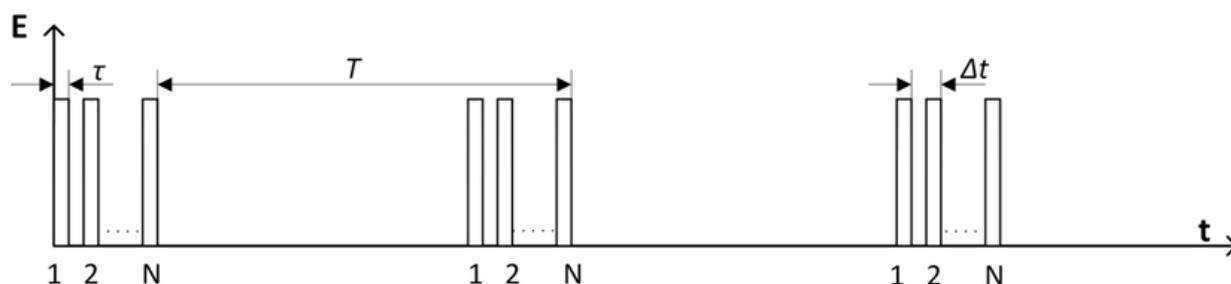


Рис. 2. *Параметры СКИ ЭМИ:  $\tau$  – длительность импульса,  $T$  – период следования,  $\Delta t$  – интервал между импульсами в пакете,  $N$  – количество импульсов в пакете*

Дело в том, что при  $\Delta t$  соизмеримым с периодом центральной несущей частоты в приемные тракты устройств будет проходить не часть спектра помехи, а большая часть энергии этих импульсов. При этом если рассматривать устройства с узкополосными каналами радиосвязи, при данных условиях влияние таких «пакетированных» импульсов будет значительно большим, чем при воздействии одиночных СКИ ЭМИ с той же частотой следования  $f_{ски}$ . Механизм влияния будет схож с влиянием на аппаратные части устройств, в случае, когда рассматривается энергия не

части спектра, а импульса в целом. Здесь при оценке степени влияния следует рассматривать такой параметр исследуемых устройств, как время восстановления канала связи при образовании блокирующей помехи и тогда для оценки влияния таких пакетов импульсов определяющим параметром будет частота следования пакетов импульсов СКИ ЭМИ.

Таким образом, сверхкороткие импульсы сложной последовательности со сравнительно низкой частотой повторения пакетов импульсов и коротким интервалом между импульсами в пакете можно рассматривать, как наименее энергетически затратное, но наиболее опасное СКИ ЭМИ при воздействии на РЭС через приемные тракты устройств.

### **Опытный образец генератора СКИ ЭМИ**

Основные заключения данной статьи подтверждены теоретическими и экспериментальными результатами с использованием опытного образца генератора СКИ ЭМИ, обладающего рядом уникальных характеристик.

В отличие от имеющихся в России источников СКИ ЭМИ, разработанный многофункциональный комплекс СКИ ЭМИ обеспечивает значительно большую энергетику поля, гибкость регулирования излучаемой мощности и частоты следования импульсов, имеет возможность формирования пакетов импульсов. Отличие от аналогичных классических СВЧ-устройств состоит в существенно большей импульсной мощности при сопоставимых или меньших массогабаритных характеристиках.

Технический результат достигается тем, что при создании комплекса воздействия СКИ ЭМИ с высокой частотой повторения используется вариант структуры излучающего комплекса, составленного из нескольких синхронно работающих излучателей малой мощности. Снижение коммутируемой мощности, приходящейся на один антенный модуль, делает возможным применение высокоскоростных полупроводниковых ключей, которые значительно повышают повторяемость характеристик импульсов, точность установки частоты следования и межимпульсных интервалов.

На рисунке 3 изображен 1 из 64 антенных модулей комплекса.

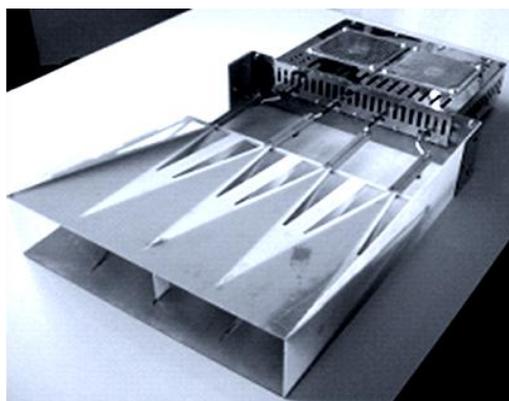


Рис. 3. Единичный антенный излучающий модуль

Общее управление комплексом осуществляется от компьютерного блока, в качестве которого обычно используются серийные ПК с усиленной помехозащищенностью. Задача компьютерного блока - задать рабочие режимы комплекса: определить частоту работы, амплитуду поля, межканальные задержки и др., что обеспечивается специальным программным обеспечением управления комплексом.

Команды от компьютерного блока подаются по оптической линии связи к блоку управления. В обратном направлении от блока управления к компьютерному блоку передаются данные о рабочих параметрах комплекса.

Блок управления по команде от компьютерного блока устанавливает необходимые рабочие режимы и подает на антенные модули импульсы запуска.

Измерение напряженности СКИ ЭМИ в точке нахождения испытываемого объекта может производиться с помощью преобразователя импульсного электромагнитного поля «ИППЛ-Л» или аналогичного [5] и осциллографа, рисунок 4. С помощью этих же средств, производится предварительная настройка по синхронизации всех каналов излучения комплекса.

Разработанный комплекс воздействия СКИ ЭМИ позволяет:

- провести экспериментальные исследования влияния СКИ ЭМИ на различные радиоэлектронные устройства;
- определить параметры излучения (напряженность поля, частота повторения импульсов, межимпульсный интервал) при которых наступают изменения штатного функционирования исследуемых устройств,
- определить потенциальный радиус действия источников СКИ ЭМИ на различные радиоэлектронные устройства;
- проводить экспериментальные исследования на малых расстояниях при сравнительно малых напряженностях поля, с аппроксимацией на большие расстояния, а также исследования на реальных расстояниях при

большей напряженности излучаемого поля, при использовании мобильного варианта исполнения.

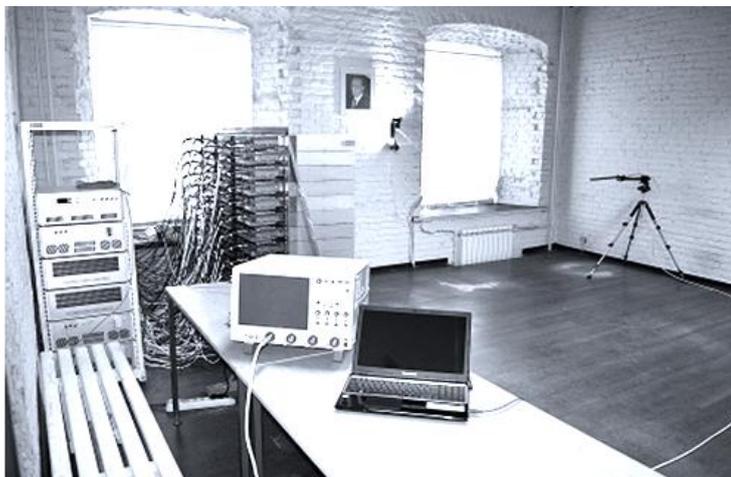


Рис. 4. *Общий вид многофункционального комплекса СКИ ЭМИ, в составе: стойка питания и управления, излучающая система, осциллограф, ПК, преобразователь импульсного электромагнитного поля.*

*Особенность построения комплекса воздействия.* Комплекс имеет 64 независимых канала излучения, при синхронизированной работе всех каналов достигается максимум амплитуды напряженности излучаемого поля. Имеются возможности управления положением максимума излучения в пространстве, формирования пакетов импульсов для исследования специфических влияний, в том числе на узкополосные средства связи.

Основные характеристики:

Излучение:

-длительность импульса - 150 пс

напряженность поля на расстоянии 100 м от комплекса:

-при частоте следования импульсов 1 МГц - 10 МГц - 1 кВ/м

-при частоте следования 50 МГц - 0,25 кВ/м

Питание:

- напряжение (3 х - фазное питание) - 380 В

- потребляемая мощность, макс - 24 кВт

Управление:

- с помощью панели управления на блоке синхронизации и управления;

- с помощью ПК со специальным ПО с передачей команд по оптоволокну;

- фиксация профилей излучения в памяти;

- гибкое изменение частоты повторения импульсов;

- гибкое изменение напряженности излучаемого поля;

- формирование пакетов импульсов;

- внешняя синхронизация частоты следования импульсов.

### **Заключение**

Рассмотренные в статье каналы влияния СКИ ЭМИ на РЭС позволяют проанализировать уязвимости устройств в условиях СКИ ЭМИ для дальнейшего принятия мер по минимизации возможного влияния такого излучения. В условиях проведения непрерывного мониторинга электромагнитной обстановки значения определяющих параметров СКИ ЭМИ могут служить параметрическими элементами для оперативного принятия решений при обеспечении устойчивого функционирования систем.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ*

*(№ НШ-6831.2016.8)*

### **Библиографический список**

1. Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения. ГОСТ Р 51317.1.5. – М.: Стандартинформ, 2009. - 36 с.
2. Пименов П.Н. Сравнительный анализ влияния сверхкороткого электромагнитного импульса на узкополосные, широкополосные, сверхширокополосные системы радиосвязи // Технологии электромагнитной совместимости. 2015. № 1(52). С. 13-16.
3. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров: Монография. – М.: МИЭМ, 2006. – 159 с.
4. Салливен Дж.П. Террористическое и нетрадиционное оружие: Справочник «Оружие мира» – М.: Моркнига, 2009.– 224 с.
5. Долматов Т.В., Букин В.В., Сахаров К.Ю., Сухов А.В., Гарнов С.В., Терехин В.А. Сверхширокополосный электрооптический преобразователь напряженности импульсного электрического поля // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 42-45.
6. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Принципы создания противонавигационного поля радиопомех // Труды МАИ. 2015. №83. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62310>

7. Электромагнитная совместимость. Часть 2-13. Окружающая среда. Электромагнитные среды высокой мощности (НРЕМ). Излучаемые и проводимые. ГОСТ IEC 61000-2-13(2005). - М.: Стандартиформ, 2005. – 44 с.