

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Газизов Тальгат Рашитович

Анализ и классификация источников преднамеренных электромагнитных помех

Учебно-методическое пособие для дисциплин,  
связанных с преднамеренными силовыми электромагнитными воздействиями

Томск 2018

## Содержание

1.	Предисловие .....	4
2.	Введение .....	5
3.	Параметры формы сигнала .....	7
3.1	Параметры временной области.....	7
3.1.1	Показатели формы сигнала .....	7
3.2	$N$ -нормы.....	13
3.3	Параметры частотной области.....	14
4.	Предлагаемые классификации источников преднамеренных электромагнитных воздействий .....	16
4.1	Спектральная классификация.....	16
4.2	Классификация по напряженности $E$ -поля .....	17
4.3	Классификация $E$ -поле-расстояние .....	18
4.4	Доступность источника.....	19
4.4.1	Гири и Теше – 2004.....	19
4.4.2	Сабат и Герби – 2009 .....	19
4.4.3	ITU – 2009 .....	20
4.5	Транспортируемость источника .....	20
4.5.1	Сабат и Герби –2009 .....	20
4.5.2	ITU – 2009 .....	21
5.	Классификация выбранных форм сигналов.....	22
5.1	Сигнальные карты.....	23
5.1.1	Оцифровка источника формы сигнала.....	23
5.1.2	Оценка быстрого преобразования Фурье формы сигнала .....	26
5.1.3	Альтернативный метод для оценки преобразования Фурье сигнала.....	27
5.1.4	Расчет формы сигнала и параметров его спектра.....	29
5.1.5	Пример сигнальной карты.....	32
5.2	База данных потенциальных источников ПДЭМВ.....	33
6.	Анализ характеристик потенциальных источников ПДЭМВ.....	36
6.1	Кондуктивные источники .....	36
6.1.1	Уровень портативности .....	36
6.1.2	Технологический уровень .....	37
6.1.3	Уровень затрат .....	37
6.1.4	Уровень портативности в зависимости от уровня технологий.....	38
6.1.5	Уровень портативности в зависимости от уровня стоимости.....	39

6.1.6	Уровень портативности в зависимости от пикового напряжения .....	40
6.2	Излучающие источники.....	41
6.2.1	Уровень транспортируемости .....	41
6.2.2	Уровень технологий.....	42
6.2.3	Уровень стоимости .....	43
6.2.4	Дальнее напряжение .....	44
6.2.5	Отношение $V_{far}/V_p$ .....	45
6.2.6	Уровень портативности в зависимости от уровня технологий.....	46
6.2.7	Уровень портативности по отношению к стоимости .....	47
6.2.8	Уровень портативности по отношению к дальнему напряжению.....	48
6.2.9	Тип полосы.....	49
6.2.10	Год .....	50
6.2.11	Год по отношению к типу полосы .....	51
7.	Обзор ожидаемых пределов потенциальных источников ПДЭМВ и их текущих технологий .....	53
7.1	Технологические пределы .....	54
7.1.1	Гиперполосные излучатели .....	55
7.1.2	Мезополосные излучатели .....	55
7.1.3	Узкополосные излучатели .....	56
8.	Заключение .....	59
	Список использованных источников .....	61

## 1. Предисловие

Данная работа основана на уникальной статье [N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein. Study and classification of potential IEMI sources // System design and assessment notes, Note 41, 8 July 2014. P. 1–48]. Она отличается своей системностью и полезностью для освоения дисциплин, связанных с электромагнитной совместимостью, особенно с преднамеренными силовыми электромагнитными воздействиями и в частности с их генерацией.

Рассмотрены исследование и классификация источников преднамеренных электромагнитных помех. Оцениваются возможности публично зарегистрированных генераторов высоковольтных импульсов и мощных электромагнитных излучателей, которые можно было бы рассматривать потенциальными источниками преднамеренных электромагнитных воздействий. Рассматривается использование методов, предложенных в литературе, для характеристики сигналов, генерируемых «реальными» источниками, для которых авторы предоставили соответствующую информацию или даже формы сигналов в документах. Также применяются определения, предлагаемые для классификации доступных источников с точки зрения их мобильности, технологического развития и уровня стоимости, с тем чтобы увидеть тенденции в развитии источников, как кондуктивных, так и излучаемых воздействий. В качестве результата этой работы к статье прилагаются два Приложения, включающие форму сигнала и спектральные параметры 39 источников, а также классификацию из 21 кондуктивного источника и 55 излучаемых источников.

## 2. Введение

Оценка уязвимости критических систем к преднамеренным электромагнитным помехам вызвала значительный интерес в ЭМС сообществе за последнее десятилетие или около того [1–5]. Перед любым анализом последствий успешной атаки преднамеренным электромагнитным воздействием, требуется хорошее знание ожидаемой электромагнитной обстановки большой мощности, чтобы определить объем рассматриваемой методологии. Для этого необходимо рассмотреть несколько вопросов, в том числе:

- Какова ожидаемая форма сигнала напряжения, которая может быть введена в кабели исследуемого объекта?
- Каков максимальный уровень поля, ожидаемый в непосредственной близости от объекта исследования?
- Каковы частоты полей, которые будут облучать стены объекта?
- Можно ли перевезти возможные источники преднамеренных электромагнитных воздействий непосредственно вблизи к объекту?
- Сколько денег потребуется злоумышленник для приобретения такого источника?

Можно было бы ожидать, что, учитывая размер ручного электронного оборудования и объектов общего назначения, большинство источников должно использовать частоты примерно от нескольких сотен мегагерц до нескольких гигагерц (около 1 ГГц согласно закону Баума [6]). В литературе имеется несколько хороших обзоров, посвященных некоторым из этих вопросов, со ссылкой на разработку, так называемого, несмертельного оружия в США [7, 8]. Кроме того, полезные аналитические предсказания ожидаемых уровней поля от источников можно найти в [9, 10]. Однако за последние несколько лет было достигнуто много успехов, и обзор имеющихся источников можно пересмотреть путем включения в него источников различных типов, о которых недавно опубликовано, и, в частности, мезополосных источников за последнее десятилетие [11–15].

Пересмотр обзора также оправдан, поскольку были предложены общие методы классификации источников в соответствии с их способностями к переносимости и доступности [9, 16, 17], но эти методы не использовались систематически для рассмотрения имеющихся источников.

В данной статье оцениваются возможности открыто опубликованных генераторов высоковольтных импульсов и мощных электромагнитных излучателей, которые можно было бы рассматривать потенциальными источниками преднамеренных электромагнитных воздействий. Большой интерес вызывает использование методов, предложенных в литературе, для характеристики сигналов, генерируемых «реальными» источниками, для

которых авторы предоставили соответствующую информацию или даже формы сигналов в документах. Также применяются определения, предлагаемые для классификации доступных источников с точки зрения их мобильности, технологического развития и уровня стоимости, с тем чтобы увидеть тенденции развития, как кондуктивных, так и излучаемых источников. В итоге приводятся два Приложения, включающие форму сигнала и спектральные параметры 39 источников, а также классификацию из 21 кондуктивного и 55 излучающих источников.

Сначала в разделе 3 рассматриваются определения формы сигнала и спектральных показателей, приведенные в литературе. Предлагаемая классификация источников в зависимости от их напряженности поля и их доступности описана в разделе 4. В разделе 5 описываются принятая процедура оцифровки исходных осциллограмм, извлеченных из документов, и шаги обработки для создания «wavecards», содержащих все соответствующие параметры, связанные с каждым источником. Также вводится методика эффективной оценки преобразования Фурье сигналов и извлечения их спектральных характеристик. Методика основана на использовании «метода матричного карандаша» для разложения форм сигналов временной области в ряд затухающих комплексных экспонент, полюсы и остатки которых можно использовать для аналитического вычисления преобразования Фурье. Также представляется использование так называемого индекса Блюмера для уменьшения времени, необходимого для оценки полосы отношения заданного спектра. В разделе 6 анализируются общие тенденции и характеристики источников, используя всесторонние круговые диаграммы и штриховые графики. Обзор возможных ограничений источника из-за физических ограничений реализованных технологий представлен в разделе 7. Цель этого раздела – привести некоторые цифры, представляющие максимальные ожидаемые пределы потенциального источника преднамеренного электромагнитного воздействия. Наконец, выводы приводятся в разделе 8.

### **3. Параметры формы сигнала**

В этом разделе будут определены показатели формы сигнала, используемые в этой работе для характеристики излучаемых и кондуктивных эмиссий различных типов источников преднамеренных электромагнитных воздействий. Прилагаются усилия по включению классификационных параметров типичных эмиссий, которые регулярно появляются в измерениях, указанных в литературе, из множества различных сигналов, которые могут встречаться в полевых условиях.

Излучаемые и проводимые сигналы можно классифицировать с использованием их характеристик во временной области или их частотного спектра. Временная и частотная характеристика источников важна для оценки уровня угрозы.

Определения характеристик формы сигнала будут представлены в двух подразделах. Первая часть будет охватывать показатели формы сигнала временной области, типично измеренные выходы генераторов преднамеренных электромагнитных воздействий и, так называемые, нормы восприимчивости, которые обычно используются для оценки уровней восприимчивости оборудования. Во второй части будут представлены показатели частотного спектра.

#### **3.1 Параметры временной области**

##### **3.1.1 Показатели формы сигнала**

###### **3.1.1.1 Параметры одиночного импульса**

Один из обычно измеряемых сигналов от гипердиапазонных/суб- гипердиапазонных генераторов, также называемых сверхширокополосными генераторами (например, [18– 23]), представляет собой одиночный импульс, который может быть представлен формой сигнала, представленной на рисунке 3.1 [24].

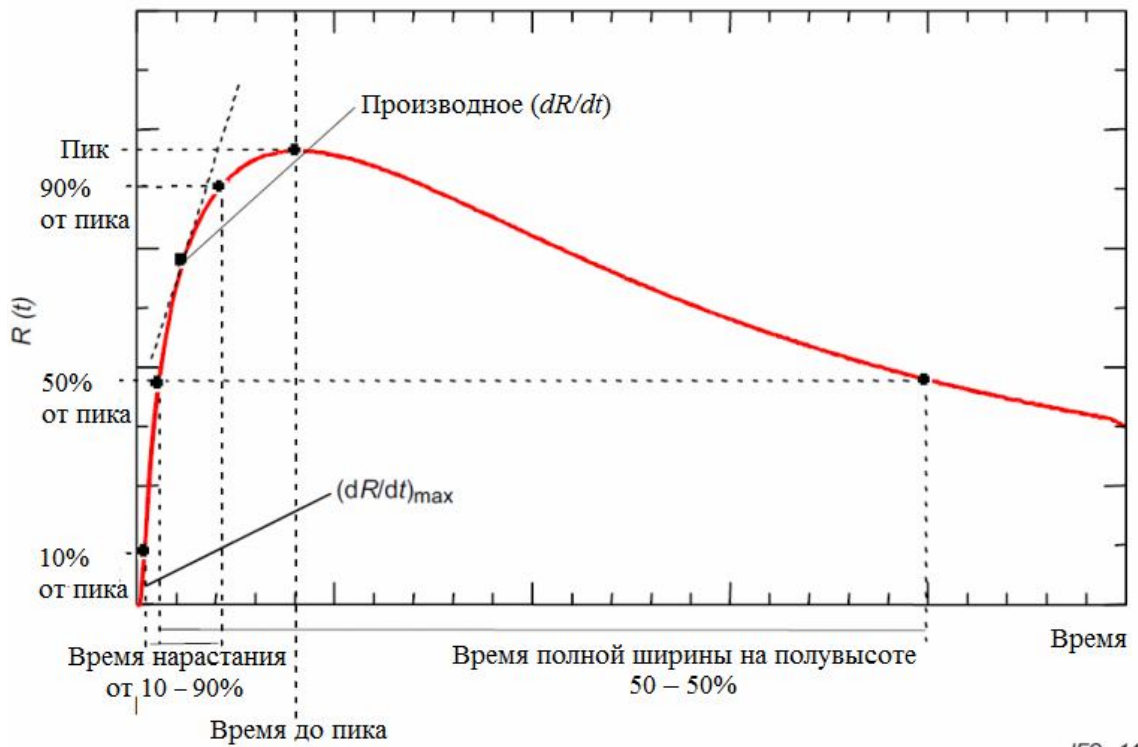


Рисунок 3.1 – Иллюстративный график монополярного импульса и параметров формы его сигнала [24]

Параметры формы сигнала временной области, характеризующие этот тип сигналов, а именно амплитуда пика, время до пика, время нарастания по уровням 10–90%, полная ширина по половине от максимума и пиковая производная также показаны на рисунке 3.1. Нужно заметить, что форма сигнала временной области  $R(t)$  была усечена, чтобы проиллюстрировать её существенные характеристики. В поздние времена  $R(t)$  должно равняться нулю для обеспечения каузальности.

а Пиковая амплитуда

Пиковая амплитуда формы сигнала  $R_{\max}$  определяется как максимальное значение сигнала во время его нарастания. Для импульсно-подобной функции она соответствует ее абсолютному максимальному значению:

$$R_{\max} = \max(|R(t)|) \quad (3.1)$$

б Время до пика

Время до пика  $\Delta t_{\max}$  определяется как время, в течение которого сигнал принимает максимальную амплитуду, начиная с уровня нулевой амплитуды:

$$\Delta t_{\max} = t|_{R(t)=R_{\max}} - \max(t|_{R(t)=0}) \quad (3.2)$$



### с Пиковая производная

Максимальная пиковая производная  $\left(\frac{dR}{dt}\right)_{\max}$  рассчитывается как максимальная производная формы сигнала до достижения ее максимальной амплитуды:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_{\max} = \max\left(\frac{dR}{dt}\right), t < t|_{R(t)=R_{\max}}. \quad (3.3)$$

### d Время нарастания по уровням 10–90%

Время нарастания по уровням 10–90%  $\Delta t_{10-90}$  определяется как время, в течение которого форма сигнала увеличивается с 10% до 90% от  $R_{\max}$ , в течение нарастания:

$$\Delta t_{10-90} = t|_{R(t)=0,9R_{\max}} - t|_{R(t)=0,1R_{\max}}, t < t|_{R(t)=R_{\max}}. \quad (3.4)$$

### e Максимальная скорость нарастания

Альтернативным определением времени нарастания, которое было предложено для анализа ядерных электромагнитных импульсов, является так называемая максимальная скорость нарастания<sup>1</sup>  $t_{mr}$  [25]. Максимальная скорость нарастания импульсно – подобного сигнала может быть определена как отношение его пиковой амплитуды и ее пиковой производной:

$$t_{mr} = \frac{R_{\max}}{\left(\frac{dR}{dt}\right)_{\max}}. \quad (3.5)$$

### f Полная ширина по половине максимума

Полная ширина по половине максимума  $\Delta t_{50-50}$ , также обычно называемая «длительностью» импульса, представляет собой время, прошедшее между моментом, когда форма сигнала достигает 50% от  $R_{\max}$ , в течение его нарастания и момента, когда он опускается до 50% от  $R_{\max}$  за время спада:

$$\Delta t_{50-50} = t \left|_{R(t)=0,5R_{\max} \wedge \frac{dR}{dt} < 0} - t \left|_{R(t)=0,5R_{\max} \wedge \frac{dR}{dt} > 0}. \quad (3.6)$$

#### 3.1.1.2 **Параметры затухающей синусоиды**

Другим распространенным типом сигнала, используемым для анализа мощных электромагнитных генераторов, является затухающая синусоидальная форма сигнала. Это типичный осциллирующий профиль так называемых мезополосных генераторов (например,

---

<sup>1</sup> Обозначение максимальной скорости нарастания использовалось в кругу специалистов по электромагнитному импульсу для обозначения этого количества, и его не следует путать с пиковой производной.

[7, 14, 26 – 29]). Для такого рода сигналов возможны три дополнительных параметра, которые могут представлять интерес. Они будут определены в следующих трех подразделах. График функции затухающей синусоиды представлен на рисунке 3.2.

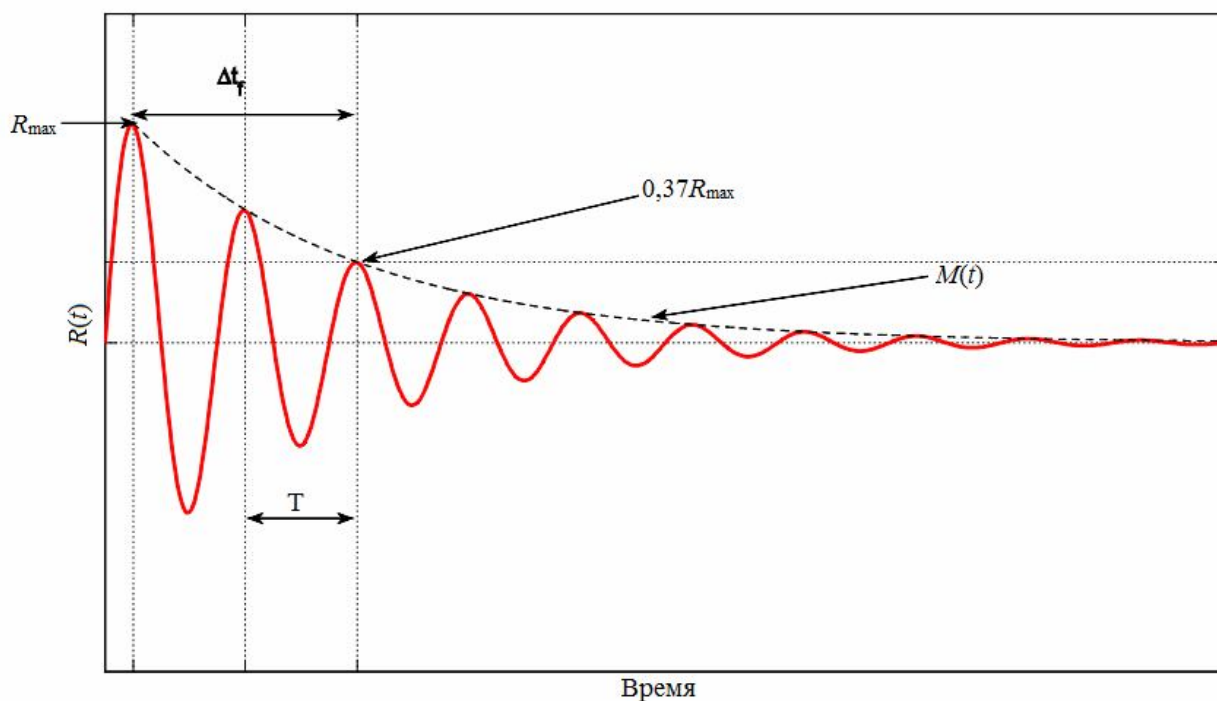


Рисунок 3.2 – Участок затухающей синусоидальной функции и параметры формы её сигнала

#### г Время спада

Время спада  $\Delta t_f$ , время затрачиваемое экспоненциальной огибающей на спад от амплитуды пика  $R_{\max}$  до значения  $\frac{1}{e} \approx 37\%$ , от  $R_{\max}$  (см. рисунок 3.2):

$$\Delta t_f = t \Big|_{M(t)R_{\max}}^{-t} \Big|_{R(t)=R_{\max}} \cdot \quad (3.7)$$

Это значение, которое также рассматривается как время «е-огибания», дает представление о коэффициенте затухания, связанном с затухающей экспоненциальной огибающей, которая ослабляет синусоиду, как показано штриховой черной линией на рисунке 3.2.

#### h Средний период

Средний период  $T$  – это период синусоидальной функции, который модулируется затухающей экспонентой. Его можно оценить, измеряя время между двумя последовательными локальными максимумами, минимумами или пересечениями нуля, как показано на рисунке 3.2. Средний период  $T$  можно использовать для оценки средней частоты затухающей синусоиды  $f_0^{\text{avg}}$  как

$$f_0^{avg} = \frac{1}{T}. \quad (3.8)$$

### і Средний коэффициент качества

Коэффициент качества затухающей синусоиды дает меру концентрации энергии на ее основной частоте. Качественно это показатель, который измеряет способность доставки энергии на настроенной частоте до того, как сигнал погаснет. Средний коэффициент качества  $Q_{avg}$  можно оценить по среднему периоду и времени спада как [30]:

$$Q^{avg} = \pi \frac{\Delta t_f}{T} = \pi f_0^{avg} \Delta t_f. \quad (3.9)$$

В практических случаях типично измеренные формы сигналов могут воспроизводить не идеальную затухающую синусоиду, а скорее колебательную форму сигнала. Однако вышеупомянутые параметры могут быть использованы для оценки свойств в среднем смысле. В качестве иллюстрации показан пример измеряемого осциллирующего сигнала, для которого анализируются характеристики осцилляционно-синусоидальных сигналов на рисунке 3.3 [24].

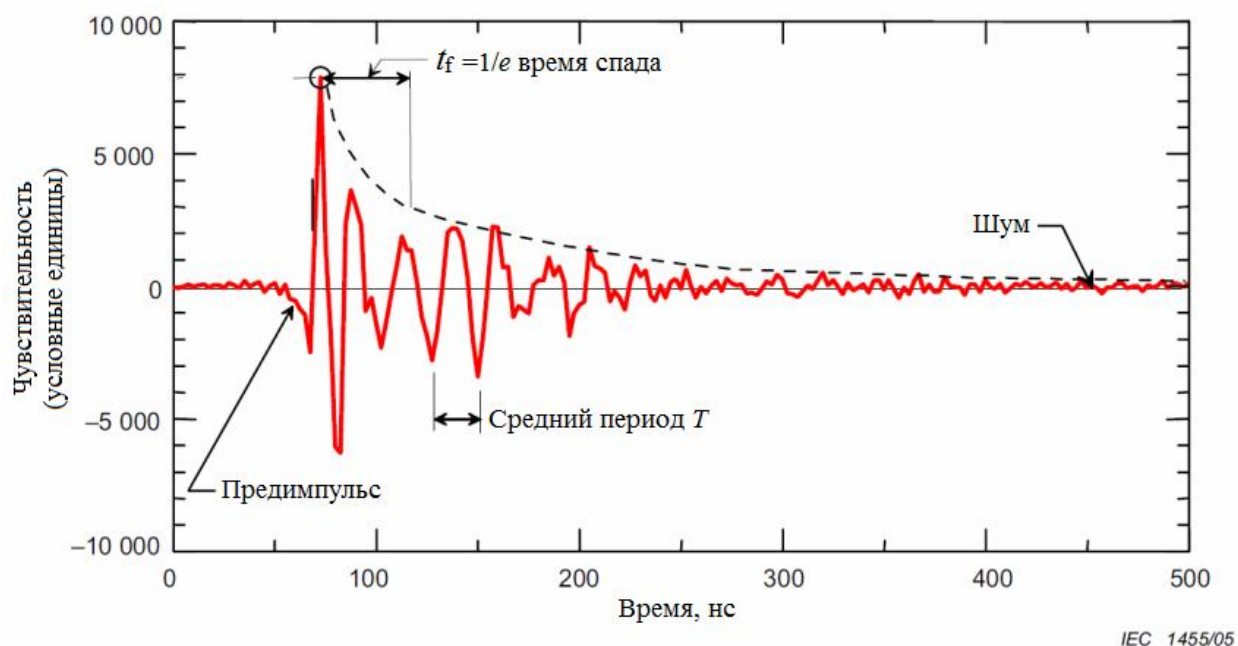


Рисунок 3.3 – Иллюстрация колебательного измеренного сигнала [24]

### 3.1.1.3 Параметры непрерывной волны

Источники непрерывной волны также обычно анализируются в области преднамеренных электромагнитных воздействий (например, [31 – 33]). Выходы непрерывной волны обычно представляют собой пачки синусоидальных импульсов, как схематически показано на рисунке 3.4. Пачки непрерывной волны можно рассматривать как синусоидальную форму сигнала с центральной частотой  $f_0$ , амплитуда которой модулируется

периодической бинарной последовательностью импульсов с заданным рабочим циклом и частотой повторения, аналогичной известному как On-Off keying или ООК в цифровой связи [34].

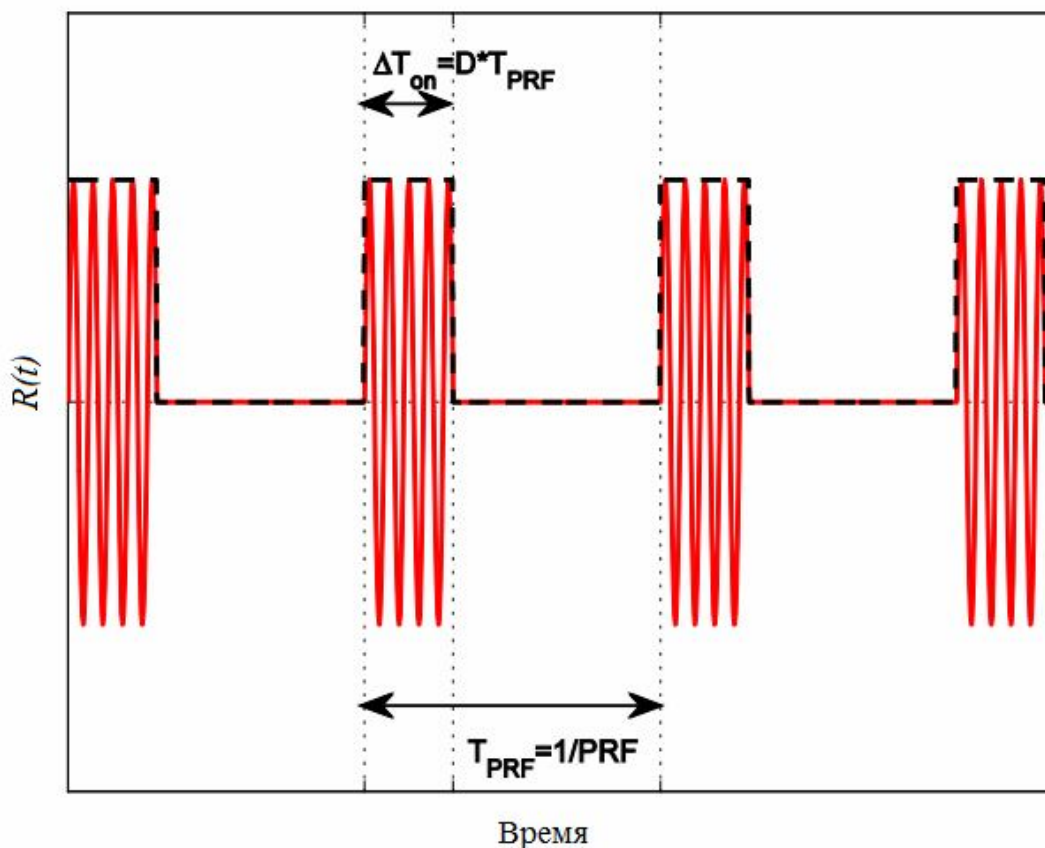


Рисунок 3.4 – Иллюстрация пачек непрерывной волны

ж Частота повторения импульсов (PRF)

Частота повторения пачек импульсов (PRF) представляет собой частоту перехода между состоянием ON-OFF-ON генератора непрерывной волны; то есть обратную периоду модулирующей последовательности импульсов  $T_{PRF}$

$$PRF = \frac{1}{T_{PRF}}. \quad (3.10)$$

Частота повторения импульсов также может быть определена для генераторов повторяющихся однополярных и затухающих синусоидальных импульсов. В этих случаях частота повторения импульсов соответствует времени, прошедшему между моментами начала двух последовательных форм сигнала.

к Рабочий цикл

Рабочий цикл пачки – это временной интервал, в течение которого активен выход непрерывного источника волны (см. рисунок 3.4), выраженный в виде доли периода пачки.

Рабочий цикл может быть рассчитан как функция частоты повторения импульсов и активного временного интервала  $\Delta T_{on}$  как

$$D = \frac{T_{on}}{T_{PRF}} = PRFT_{on}. \quad (3.11)$$

### 3.2 $N$ -нормы

Так называемые,  $N$ -нормы являются параметрами, которые используются для характеристики сигнала во временной области, и исторически были предложены, чтобы определить пределы восприимчивости оборудования. Особый интерес к использованию норм обусловлен тем, что их можно использовать для указания влияния данного поля на системы [24, 35]. Расчет  $N$ -норм основан на применении математических операторов ко всей форме сигнала. Краткое изложение определения норм  $N1 - N5$  вместе с указанием на то, почему норма представляет особый интерес, представлено в таблице 3.1, воспроизведенной из [8, 24].

Таблица 3.1 –  $N$ -нормы, используемые для мощных переходных сигналов [7, 27]

Норма	Название	Применение
$N_1 =  R(t) _{\max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
$N_2 = \left  \frac{\partial R(t)}{\partial t} \right _{\max}$	Пиковая (абсолютная) производная	Искрение компонента / сбой схемы
$N_3 = \left  \int_0^t R(t) dt \right _{\max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой (если $R$ обозначает поле $E$ )
$N_4 = \int_0^{\infty}  R(t)  dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
$N_5 = \left\{ \int_0^{\infty}  R(t) ^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

Обратите внимание, что первые две нормы соответствуют уже описанной амплитуде пика и пиковой производной сигналов. Если рассчитывается отношение  $N_1/N_2$ , также получается максимальная скорость нарастания. Таким образом, можно было бы думать о новом определении времени нарастания «на основе норм» как [36]:

$$t_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\text{амплитуда пика}}{\text{пиковое производное}} = t_{mr}, \quad (3.12)$$

где индекс  $N$  обозначает расчет времени нарастания на основе «норм».

### 3.3 Параметры частотной области

Параметры сигналов в частотной области получены из частотного спектра этих сигналов. Частотный спектр может быть оценен путем вычисления преобразования Лапласа вдоль мнимой оси  $j$  или путем прямого вычисления преобразования Фурье от формы сигнала во временной области. Рассмотрим иллюстрацию частотного спектра формы затухающей синусоиды на рисунке 3.5.

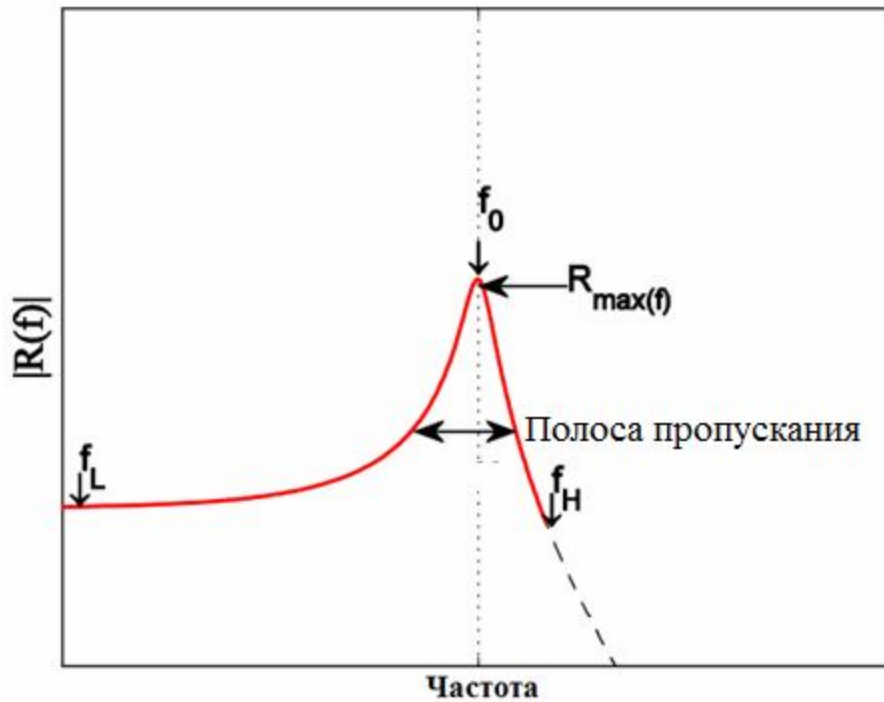


Рисунок 3.5 – Иллюстрация частотного спектра затухающей синусоиды

#### а Пиковая спектральная амплитуда

Пиковая спектральная амплитуда  $R_{\max(f)}$  соответствует максимальной амплитуде частотного спектра формы сигнала:

$$R_{\max(f)} = \max(|R(f)|). \quad (3.13)$$

#### б Центральная частота

Центральная частота  $f_0$  соответствует частоте, на которой вычисляется  $R_{\max(f)}$ :

$$f_0 = f \Big|_{|R(f)|=R_{\max(f)}}. \quad (3.14)$$

Для сигнала, имеющего несколько локальных максимумов, нельзя однозначно определить одну центральную частоту. В этом случае термин «резонансные частоты» используется для обозначения точек, где оцениваются локальные максимумы.

#### с Отношение полосы

Отношение полосы, это частное, которое обычно используется для классификации характера выхода высокоомощного электромагнитного генератора. Отношение полосы спектра определяется как [8, 9, 33]:

$$br = \frac{f_H}{f_L}, \quad (3.15)$$

где низко- и высокочастотные пределы  $f_L$  и  $f_H$  определены как наименьший интервал, в котором содержится 90% энергии [9, 33]:

$$\inf\{(f_H - f_L : \{f_H, f_L\} \text{ in } A_{0,9})\},$$

$$A_{0,9} = \frac{\left\{ \int_{f_L}^{f_H} |R(f)|^2 df \right\}^{\frac{1}{2}}}{\left\{ \int_0^{\infty} |R(f)|^2 df \right\}^{\frac{1}{2}}} = 0,9. \quad (3.16)$$

Версия частотной области нормы  $N_5$  используется в ((3.16) для вычисления частотного интервала. Для спектров с большим содержанием постоянного тока наименьший предел частоты номинально определяется как 1 Гц. Это показано на рисунке 3.5, хотя значение 1 Гц явно не показано на рисунке.

Интервал между  $f_L$  и  $f_H$  иногда называют шириной полосы по 90% энергии  $BW_{90}$ :

$$BW_{90} = f_H - f_L. \quad (3.17)$$

#### d Коэффициент качества

Коэффициент качества резонансных сигналов уже определен из характеристик временной области формы сигнала. И наоборот, коэффициент качества сигнала можно оценить по его спектральным характеристикам как [36]

$$Q = \frac{f_0}{BW_{-3dB}}, \quad (3.18)$$

где  $BW_{-3dB}$  – это частотный интервал, ограниченный предельными значениями минус 3 дБ, измеренными от центральной частоты.

## 4. Предлагаемые классификации источников преднамеренных электромагнитных воздействий

В течение последнего десятилетия или около того изучение преднамеренных электромагнитных воздействий привело к различным попыткам классификации полей, создаваемых высокомоощными электромагнитными источниками, также рассматриваемых как преднамеренные электромагнитные обстановки. Среди первых, если не первый, Гири предложил классификацию преднамеренной электромагнитной обстановки в соответствии со спектральными параметрами и напряженностью электрического поля генерируемых сигналов [9, 37].

В литературе были предложены другие классификации, основанные на оценке вероятности атаки преднамеренными электромагнитными воздействиями с точки зрения возможности физического приближения источника к цели или необходимого опыта для управления источником. В общем, прогнозирование возникновения атаки преднамеренными электромагнитными воздействиями является очень сложной задачей, так как задействованы многие субъективные критерии. Тем не менее, некоторые авторы [17] попытались рассмотреть возможность того, что данное высокомоощное электромагнитное оружие находится в непосредственной близости от цели, оценив следующие два фактора:

- *Доступность* источника: насколько сложно создать или приобрести данный источник?

- *Транспортируемость (мобильность)* источника: насколько сложно транспортировать данный источник?

Оценка каждого из этих факторов зависит от критериев эксперта по электромагнитной совместимости и эксперта по безопасности объекта. Однако некоторые руководящие принципы в классификации могут быть получены из доступных публикаций.

В этом разделе мы рассмотрим классификации, появляющиеся в литературе, в соответствии с спектральными и амплитудными параметрами преднамеренной электромагнитной обстановки (IEME) и более субъективными понятиями, такими как доступность и переносимость источников.

### 4.1 Спектральная классификация

Первая попытка классифицировать высокомоощные электромагнитные генераторы была разработана Гири [37]. Предложенная классификация была сделана в соответствии со спектром создаваемой обстановки, используя как процентную ширину полосы частот, так и отношение полосы генерируемых сигналов. Как было сказано в [8, 9], использование



процентной полосы для классификации IEME может быть неадекватным в контексте сигналов со сверхширокой полосой пропускания, поскольку оно исходит из «точки зрения связи». С другой стороны, концепция отношения полосы была получена из физического понимания генерируемых полей уже в то время существующими высокомошными электромагнитными источниками. Предлагаемая классификация позднее была стандартизирована МЭК в 2005 г. [10]. Классификация обстановок в соответствии с отношением полосы (см. раздел 3.3) представлена в таблице 4.1 [8, 9].

Таблица 4.1 – Классификация обстановок в соответствии с отношением полосы

Тип полосы	Отношение полосы, $br$
Гипополосный	$\leq 1,01$
Мезополосный	$1,010 < br \leq 3$
Суб –гиперполосный	$3 < br \leq 10$
Гиперполосный	$br \geq 10$

## 4.2 Классификация по напряженности E-поля

Другим подходом для классификации IEME, создаваемых источниками НРЕМ, является рассмотрение генерируемого E-поля на заданном расстоянии от источника [9]. Основной интерес состоит в том, чтобы предсказать возможную угрозу электронному оборудованию в непосредственной близости от IEME из-за данного высокомошного электромагнитного источника. Существует несколько публикаций, посвященных восприимчивости электронного ИТ-оборудования [27, 37, 38–42]. Общие рекомендации, обобщающие различные исследования восприимчивости до 2004 г., можно найти в [43].

Что касается возможных воздействий мощных излучателей на электронное оборудование, то Гири предложил 4-уровневую классификацию последствий в соответствии с порядком величин генерируемого E-поля и механизма воздействия [40]. Предлагаемая классификация представлена в таблице 4.2. Обратите внимание, что механизм воздействия front-door/back-door (см. [36] для определения механизмов воздействия) также влияет на амплитуды, необходимые для создания определенного последствия.

Таблица 4.2 – Классификация электромагнитных эффектов по напряженности электрического поля [40]

Эффект	Следствие	Воздействия Front-door/back-door	Порядок величины, В/м
Шум	Безвредно	Front-door	$10^0$
Ложная информация	Может быть критично	Front-door	$10^1$
Временный сбой	Систему можно восстановить	Back-door	$10^2$
Необратимое повреждение	Может быть критично	Back-door	$10^3$

Сабат также предложил классификацию E-полей в соответствии с так называемым уровнем угрозы, как указано в таблице 4.3 [44]. Однако в литературе мало информации о обосновании выбора амплитуд.

Таблица 4.3 – Классификация силы E – поля в соответствии с уровнем угрозы [44]

Уровень угрозы	Описание	Амплитуда
XL	Крайне низкий	<0,1 кВ/м
L	Низкий	0,1 – 1 кВ/м
M	Средний	1 – 10 кВ/м
H	Высокий	10 – 100 кВ/м
XH	Крайне высокий	>100 кВ/м

### 4.3 Классификация E-поле-расстояние

В отличие от НЕМР обстановок, IEME, производимая высокомошными электромагнитными излучателями, зависит от расстояния, и амплитуда ожидаемых полей на заданном расстоянии будет зависеть от технологии источника и антенны. Излучаемые поля, генерируемые любой антенной в дальней зоне, обратно пропорциональны расстоянию, и поэтому нормированное к расстоянию E-поле ожидается постоянным. Это нормированное к расстоянию E-поле источника определяется как его «дальнее напряжение»  $V_{far}$  [9]:

$$V_{far} = rE_f, \quad (4.1)$$

где  $r$  – расстояние, а  $E_f$  – поле в дальней зоне, создаваемое источником.

Хотя этот параметр обычно рассматривается в литературе, насколько это известно авторам, никакой классификации источников в зависимости от их дальнего напряжения предложено не было. Три из самых высоких показателей дальнего напряжения в литературе:

JOLT [18]: 5,3 МВ;

GIMLI [45]: 1,4 МВ;

Прототип IRA [46]: 1,281 МВ.

Генерация полей НРЕМ обычно требует возбуждения заданной антенны высоковольтным генератором. Другим параметром высокомошных электромагнитных источников, который использовался в литературе для сравнения их характеристик, является отношение дальнего напряжения к пиковому напряжению генератора  $V_{far}/V_0$ . Он описывает эффективность источника при преобразовании исходного импульса в желаемое дальнее поле.

Обратите внимание, что это соотношение зависит как от антенны, так и от характеристик генератора (включая скорость переключения). Для импульсных излучающих антенн амплитуда дальнего напряжения связана с производной входного импульса, и поэтому время нарастания играет значительную роль в получении высоких отношений  $V_{far}/V_0$ .

Три из самых высоких показателей  $V_{far}/V_0$  в литературе:

Прототип IRA [46]: 10,68 ( $V_{far}=1281$  кВ, полученное генератором  $\pm 60$  кВ/100 пс);

JOLT [18]: 5,3 ( $V_{far}=5,3$  МВ, полученное генератором 1 МВ/180 ps);

IRA II [8]: 4,60 ( $V_{far}=690$  кВ полученное генератором  $\pm 75$  кВ/85 ps).

#### 4.4 Доступность источника

Доступность источника описывает его достижимость в соответствии с уровнем сложности базовых технологий. В литературе предложены различные классификации, чтобы оценить это свойство источников.

##### 4.4.1 Гири и Теше – 2004

Гири и Теше предложили в [9] классифицировать технологию источника так:

Низкотехнологичные системы: характеризуются умеренной производительностью, минимальными техническими возможностями и легко собираются и развертываются, будучи упрятыми за диэлектрическими стенками в грузовиках и аналогичных транспортных средствах.

Среднетехнологичные системы: требуют навыков квалифицированного инженера-электрика и относительно более сложных компонентов, таких как коммерчески доступная радиолокационная система, которая может быть модифицирована, чтобы стать оружейной системой.

Высокотехнологичные системы: требуют специализированных и сложных технологий и, возможно, даже специальной настройки, чтобы нанести серьезный ущерб конкретной цели.

##### 4.4.2 Сабат и Герби – 2009

В более поздней публикации Сабат и Герби использовали термин технологический вызов для описания знаний и усилий, необходимых для проектирования, сборки и эксплуатации источника [16]. Они предлагают рассмотреть уровень сложности базовых технологий, уровень знаний для проектирования и эксплуатации источника, наличие компонентов на рынке и затраты на классификацию источников таких как:

низкотехнологичные системы;

среднетехнологичные системы;

высокотехнологичные системы;

высокосложные системы.

К сожалению, очень мало поясняется, как классифицировать данный источник в одну из вышеуказанных категорий.

#### **4.4.3 ITU – 2009**

В том же году термин «доступность» был предложен в [17] для измерения как стоимости, так и технологической сложности источника. Категории, предложенные ITU:

- потребительская;
- любительская;
- профессиональная;
- заказная.

Опять же, не было дано четких критериев относительно того, как классифицировать источник в данную категорию; но приводятся некоторые примеры.

Среди всех критериев, которые были предложены в литературе для классификации доступности источника, возможно, самым простым для измерения является стоимость источника. Сабат и Гербе предложили следующие разумные диапазоны в [16]:

- низкая стоимость: менее 1 тыс. €;
- умеренная стоимость: от 1 тыс. € до 100 тыс.€;
- средняя стоимость: от 100 тыс. € до 1 млн. €;
- высокая стоимость: более 1 млн. €.

#### **4.5 Транспортируемость источника**

Переносимость источника оценивает требования в отношении размера, веса и энергоснабжения, которые определяют уровень сложности, с которым источник может быть физически перемещен ближе к цели. Что касается доступности, категории для оценки транспортируемости источника попадают под критерии экспертов. Однако в недавних публикациях есть некоторые рекомендации, которые могут служить инструментом для классификации.

##### **4.5.1 Сабат и Герби –2009**

Термин, используемый для характеристики переносимости источника в [16] – это подвижность (мобильность). Предложены для оценки следующие категории:

Стационарный: источник является частью фиксированной установки.

Транспортируемый: источник, который может транспортироваться между различными точками, но во время работы система должна быть стационарной в одном месте.

Подвижный (мобильный): источник, который может быть интегрирован в мобильную платформу и может работать во время движения платформы.

Очень подвижный: мобильный источник, который имеет возможность работать в нераскрываемом виде в городских условиях.

Высокомобильный: мобильный источник, который имеет возможность работать в нераскрываемом виде внутри зданий или транспортных систем.

#### 4.5.2 ITU – 2009

ITU [17] предложил термин *портативность* для описания транспортируемости источников. Различают четыре уровня *портативности*:

Карманные или нательные: применяется к устройствам, которые могут быть скрыты на теле и/или в одежде человека.

Размера портфеля или рюкзака: относится к устройствам, которые слишком велики, чтобы быть скрытыми на человеческом теле и/или в одежде, но все еще достаточно малы, чтобы носить его (например, в портфеле или рюкзаке).

Размера транспортного средства: относится к устройствам, которые слишком велики, чтобы транспортировать их человеком, но достаточно большие, чтобы их можно было скрыть в типичном потребительском автомобиле.

Размера трейлера: применяется к устройствам, которые слишком велики, чтобы переноситься человеком или скрываться в типичном потребительском автомобиле.

Такие устройства угрозу требуют перевозки с использованием коммерческого/промышленного транспортного средства.

## 5. Классификация выбранных форм сигналов

Чтобы оценить потенциальные ИЕМИ источники и формы сигналов, которые они способны генерировать, собраны статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, докладах конференций, стандартах, презентациях конференций, онлайн каталогах и брошюрах, а также некоторых книгах, в которых сообщается о кондуктивных и излучаемых источниках. Характеристики всех источников включены в базу данных сигналов и источников, которые можно использовать, чтобы определить некоторые тенденции. Отбор рассматриваемых публикаций делался, если упоминались и именно измерялись, по крайней мере, некоторые основные характеристики источников. Конечно, информация, которую можно собрать о каждом источнике, меняется в зависимости от вида публикации и, следовательно, могли быть получены не все параметры источников.

В качестве потенциальных ИЕМИ источников выбраны опубликованные высоковольтные источники и НРЕМ излучатели, которые, из-за их мобильности и простоты в эксплуатации, наиболее легко разворачиваются против городских или сельских объектов. Транспортируемость источника является не единственным объективным критерием, поскольку, например, многие гиперполосные излучатели сложно транспортировать из-за размера антенны. Аналогично, многие мощные излучатели требуют тяжелых первичного источника и импульсного силового каскада, которые подразумевают использование больших тягачей и вряд ли, могут работать незаметно. Предприняты усилия по включению как можно большего количества источников, при условии, что они могут функционировать без какой-либо фиксированной установки, используя первичные источники энергии, которые могут эксплуатироваться, используя батареи или транспортируемые электростанции. Во многих случаях, транспортабельность источников не могла быть непосредственно оценена из-за отсутствия информации.

В общем, кондуктивные источники, обеспечивающие выходные импульсы в диапазоне нескольких сотен киловольт с умеренной длительностью (сотни наносекунд) доступны на рынке, и их транспортабельность ограничена лишь их незначительными размерами и весом. Высокомощные источники требуют использования больших конденсаторов и катушек индуктивности для аккумуляции энергии, что в результате приведет к увеличению веса источника. Источники, которые внесены в базу данных, являются, в основном, испытательными источниками, которые используются в лабораториях ЭМС для испытаний на электростатический разряд, молнию, электромагнитный импульс ядерного взрыва. Отмечено, что источники низкого напряжения также могут рассматриваться, как потенциальные кондуктивные источники, и некоторые примеры включены в базу данных. С

другой стороны, выбор НРЕМ излучаемых источников являются более сложными, так как должны быть рассмотрены высоковольтный генератор и антенна. Как уже упоминалось, выходные антенны типичных гипер-полосных источников чаще всего имеют большие размеры, соответствующие требованию излучения в низкочастотном диапазоне (ниже примерно 200 МГц). Кроме того, высокосложные излучатели с увеличенным коэффициентом усиления за счет использования отражателей требуют определенной стабильности, чтобы обеспечить корректную фокусировку луча и, следовательно, маловероятно их функционирование во время движения. Излучаемые источники, которые были включены в базу данных, в основном получены из рецензируемых журнальных статей, докладов конференций, стандартов. Это показывает, что многие из имеющихся источников все еще находятся на стадии разработки, и их коммерческое изготовление не очень распространено. В базе данных не рассматривались НРЕМ-излучатели [47] (как правило, присутствующие в радарх и испытательных установках), которые требуют большой мощности для охлаждения и запитки выходов непрерывного воздействия.

Собранная информация помещена в две отдельные базы данных, содержащие:

опубликованные форму сигнала на выходе источника, частотный спектр и перечень различных временных и спектральных параметров, представленных в разделе 3;

перечень характеристик источника, включая его классификацию в соответствии с критериями, изложенными в разделе 4.

Первая база данных доступна в Приложении А, в виде коллекции «Сигнальные карты», содержащей всю вышеупомянутую информацию. Шаги и операции, выполненные для вычисления всех параметров форм сигнала и спектра, кратко представлены в разделе 5.1.

Вторая база данных доступна в Приложении В в виде электронной таблицы. Некоторые критерии классификации источников кратко описаны в разделе 5.2.

## **5.1 Сигнальные карты**

В этом подразделе кратко пояснены необходимые шаги для разработки сигнальных карт, включенных в Приложение А.

### **5.1.1 Оцифровка источника формы сигнала**

Первый шаг в создании сигнальной карты – оцифровка найденной в документе формы сигнала. Для этого использован сканер для оцифровки документов бумажных носителей и *PDF-reader* для документов, доступных в электронном формате, чтобы получить изображение формы сигнала. Использовался *Engauge digitizer* (программа в свободном доступе) для преобразования изображений в векторы чисел, которые будут обрабатываться основным программным обеспечением. Важно отметить, что оцифровка сигнала с бумаги не

гарантирует, что все спектральные параметры сигнала будут правильно воспроизведены. Тем не менее, можно ожидать удовлетворительной аппроксимации реального, измеренного сигнала и его свойств. Чтобы показать этот процесс, используется рисунок 5.1, который показывает пример изображения формы сигнала и его оцифрованную версию после использования *Engauge digitizer*. Форма волны соответствует дальнему напряжению НРЕМ источника, приведенному в [48].

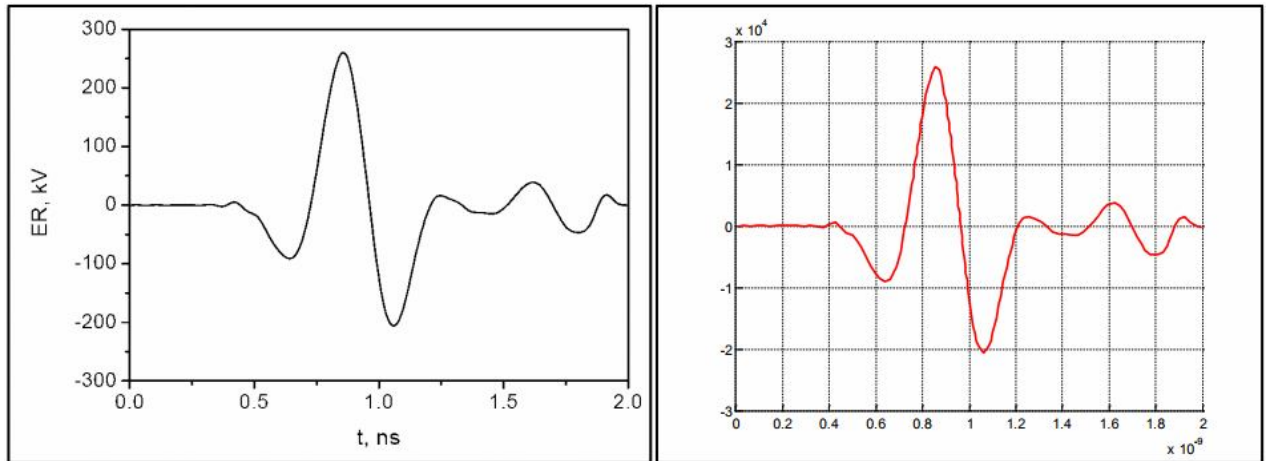


Рисунок 5.1 – Оцифрованное изображение (справа) сигнала дальнего напряжения источника, представленного в [48] (слева)

Поскольку точки сигнала, предоставляемые *Engauge digitizer*, не выбираются с равномерным шагом по времени, весь сигнал интерполируется с использованием 1024 точек с равномерным шагом по времени. Выбранная скорость выборки интерполяции независима от скорости выборки в области, которая использовалась для записи формы сигнала. Вполне нормально, что оцифрованные сигналы не исчезают полностью в поздние моменты времени, из-за усечения исходной формы сигнала в документе или из-за ошибок оцифровки программы. Поэтому имеется окно выбора сигналов с квазипрямоугольным единичным импульсом, созданным с помощью комплементарной функции ошибки [49]:

$$u_{erfc}(t) = \frac{1}{2} \left( \operatorname{erfc} \left( \frac{t-t_b}{0.55t_d} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{t-t_a}{0.55t_f} \right) \right) \quad (5.1)$$

где  $t_a-t_b$  – полная длительность импульса по половине амплитуды,  $t_d$  – время нарастания импульса по уровням 10–90%,  $t_f$  – время спада импульса по уровням 10–90%.

Окно графика *erfc* для случая  $t_d=t_f=5$ ,  $t_a=90$  и  $t_b=10$  показано на рисунке 5.2.



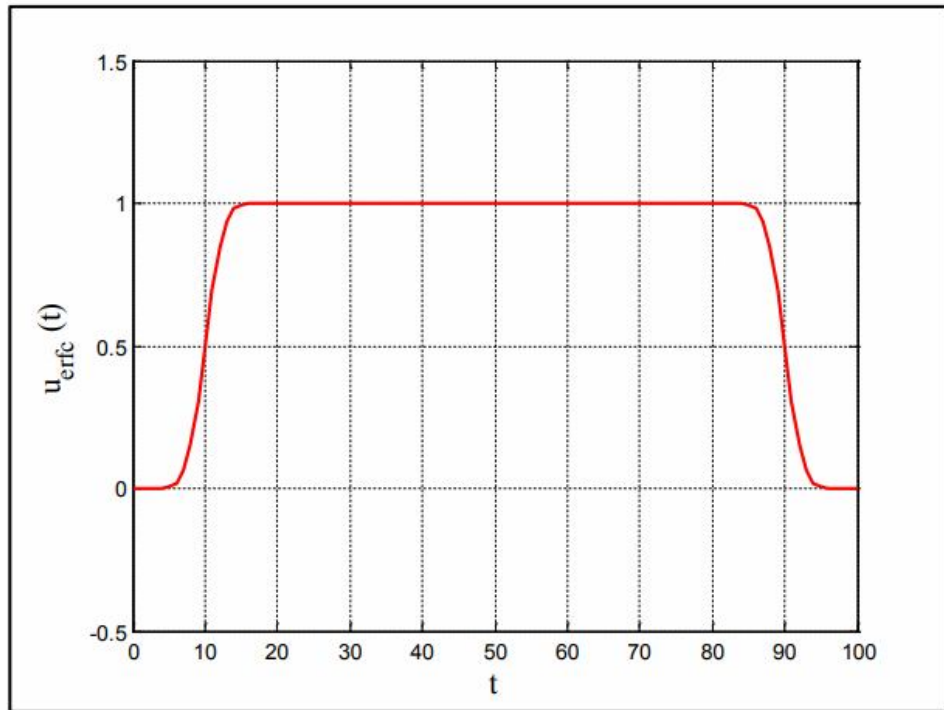


Рисунок 5.2 – Пример функции  $U_{erfc}$  для  $t_d=t_f=5$ ,  $t_a=90$  и  $t_b=10$

Для выполнения кадрирования выбранных форм сигналов выбираются константы времени ((5.1) так, чтобы ранний подъем окна не изменял поведение раннего времени оцифрованного сигнала. С другой стороны, время спада также выбирается так, чтобы оконный сигнал плавно сходился к нулю в позднее время. Использование функции *erfc* обеспечивает плавный переход в возрастающем и убывающем полях окна и поэтому уменьшается численный спектральный шум из-за разрывов.

После кадрирования цифрового сигнала выполняется дополнение нулями до 2048 образцов для увеличения разрешения БПФ, которое выполняется на следующем шаге. Пример метода кадрирования формы сигнала, представленной на рисунке 5.1, приведен на рисунке 5.3. Влияние окна незаметно и плавный переход к нулю обеспечивается в начальном и конечном моментах времени.

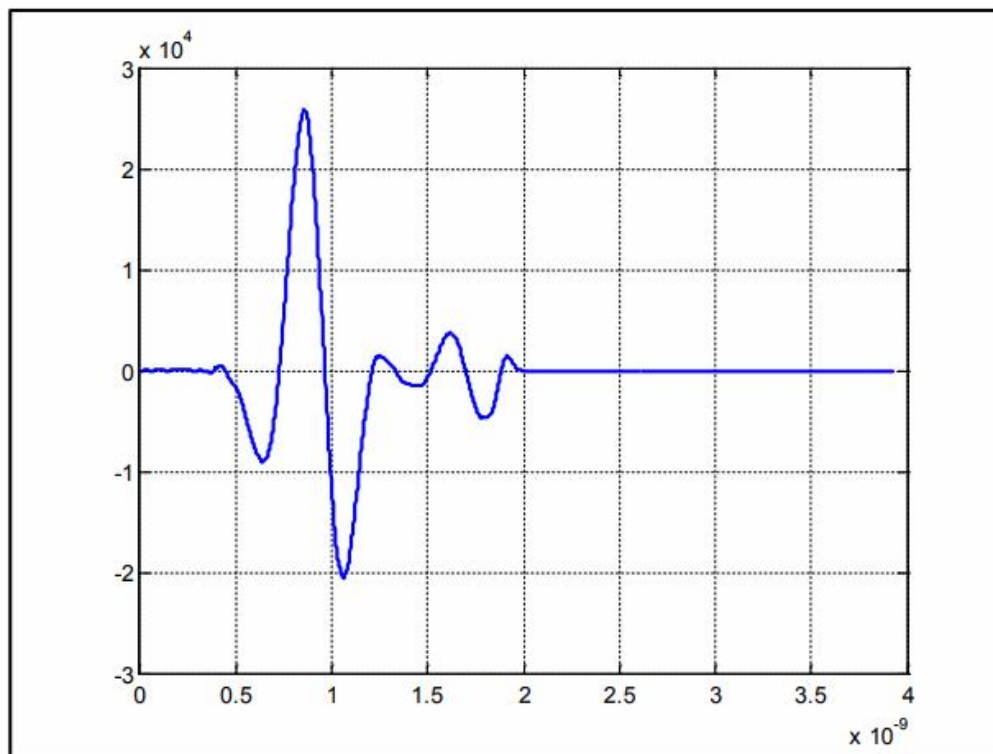


Рисунок 5.3 – Метод кадрирования оцифрованного сигнала на рисунке 5.1

### 5.1.2 Оценка быстрого преобразования Фурье формы сигнала

После оцифровки временной области формы сигнала, спектр сигнала был рассчитан с помощью БПФ. Если не требуется лучшее разрешение частоты, БПФ будет выполнено именно с 2048 выборками. Информация БПФ использовалась для вычисления следующих спектральных параметров (см. раздел 3): пиковая спектральная амплитуда, центральная частота, коэффициент качества, пропускная способность по уровню минус 3 дБ, полоса по 90% энергии, и отношение полосы.

Точность определения полосы пропускания по уровню минус 3 дБ, а следовательно, и коэффициент качества зависят от разрешения по частоте БПФ и, следовательно, дополнение нулями может быть использованы для уменьшения шага по частоте. С другой стороны, оценка отношения полосы заданного сигнала с помощью уравнений (3.15)–(3.17) становится трудоемким, если БПФ спектра вычисляется над большим количеством частотных точек.

Полоса по 90% энергии  $BW_{90}$  рассчитывается итеративно путем прохода по всем возможным частотным точкам дискретного спектра сигнатуры НРЕМ и, для каждой пары выбранных частотных точек необходимо выполнить процедуру интегрирования. Таким образом, желательно вычислить  $BW_{90}$  из спектров, содержащих уменьшенное количество точек, но содержащих необходимое количество информации для правильного расчета пределов. Традиционные схемы выборок с уменьшенным эквидистантным линейным или

логарифмическим шагами могут не эффективно представлять спектры, так как могут быть потеряны резонансы.

### 5.1.3 Альтернативный метод для оценки преобразования Фурье сигнала

Из-за ранее упомянутых проблем, в этой работе использован альтернативный метод оценки частотного спектра формы сигналов. Рассмотрим аппроксимацию формы сигнала  $r(t)$ , как сумму  $m$  затухающих комплексных синусоид:

$$r(t) \approx \sum_{i=1}^m A_i e^{s_i t} u(t) \quad (5.2)$$

где остатки  $A_i$  и полюса  $s_i$  – комплексные числа и  $u(t)$  – это функция Хевисайда. Условие затухающей экспоненты этого базиса будет гарантировать существование преобразования Фурье от  $r(t)$ , поскольку реальная часть комплексных полюсов отрицательна и, следовательно, сигнал должен исчезнуть в бесконечном времени, т.е.

$$s_i = \sigma_i + j\omega_i, \sigma_i < 0 \quad (5.3)$$

Преобразование Фурье от  $r(t)$  можно аппроксимировать как

$$R(\omega) = \mathfrak{Z}(r(t)) \approx \mathfrak{Z}\left(\sum_{i=1}^m A_i e^{s_i t} u(t)\right) = \sum_{i=1}^m A_i \mathfrak{Z}(e^{s_i t} u(t)) = \sum_{i=1}^m \frac{-A_i}{s_i - j\omega} \quad (5.4)$$

Чтобы получить хорошее приближение исходной формы сигнала, должно быть выбрано необходимое число полюсов  $m$ .

Интересная особенность этого метода заключается в том, что если остатки и полюсы исходной формы сигнала могут быть восстановлены, его преобразование Фурье может быть оценено аналитически с использованием (5.4) в любой желаемой частотной точке, а алгоритмы расчета отношения полосы могут быть улучшены, так как выборка спектра с регулярным частотным шагом больше не требуется.

#### 5.1.3.1 Процедура оценки

Для извлечения остатков и полюсов сигналов использован матрично-пучковый метод (МРМ) [50]. Этот метод оказался очень эффективным в извлечении остатков и полюсов сигналов, содержащих помехи. Чтобы выбрать число  $m$  полюсов, которые правильно воспроизводят форму сигнала, сигнал сначала расширяется в увеличенном количестве комплексно-сопряженных пар полюсов (обычно 25 пар). Ожидается, что полюса, которые вносят наибольший вклад в расширение сигналов, имеют наибольшие остатки. Таким образом, полученные полюса сортируются по убыванию абсолютной величины их остатков. Затем число полюсов  $m$  выбирается так, чтобы минимизировать нормированную

среднеквадратическую ошибку ( $MSE$ ) между исходным сигналом и аппроксимированным сигналом с  $m$  полюсами [51]:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_t |r(t) - r_{rec}(t)|^2}{\sum_t |r(t)|}} \quad (5.5)$$

где  $r_{rec}(t)$  – сигнал, реконструированный с помощью ((5.2).

В конце, преобразование Фурье вычисляется аналитически с помощью (5.4) для требуемых частотных точек. Рисунок 5.4 представляет собой пример измеренного сигнала и его реконструкции с МРМ. Красный сигнал соответствует электрическому вертикальному полю, создаваемому коммутируемым генератором EPFL, подключенным к монополярной антенне [12]. Формы сигналов во временной области представлены в верхней части рисунка, а частотный спектр – нижней. Форма сигнала синего цвета была реконструирована с использованием 26 полюсов, в результате чего  $MSE=2,3 \times 10^{-3}$ . Красный спектр был вычислен с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) исходной формы сигнала, а синий – из (5.4).

Несмотря на то, что восстановление сигнала во временной области находится в очень хорошем согласовании с измерением, некоторые различия можно наблюдать в спектрах на низких и высоких частотах. Преимущество аналитического спектра состоит в том, что поскольку реконструированный сигнал должен исчезнуть в позднее время, он должен дать каузальное преобразование Фурье. Иначе, спектр, вычисленный с помощью БПФ, может содержать ошибки усечения.

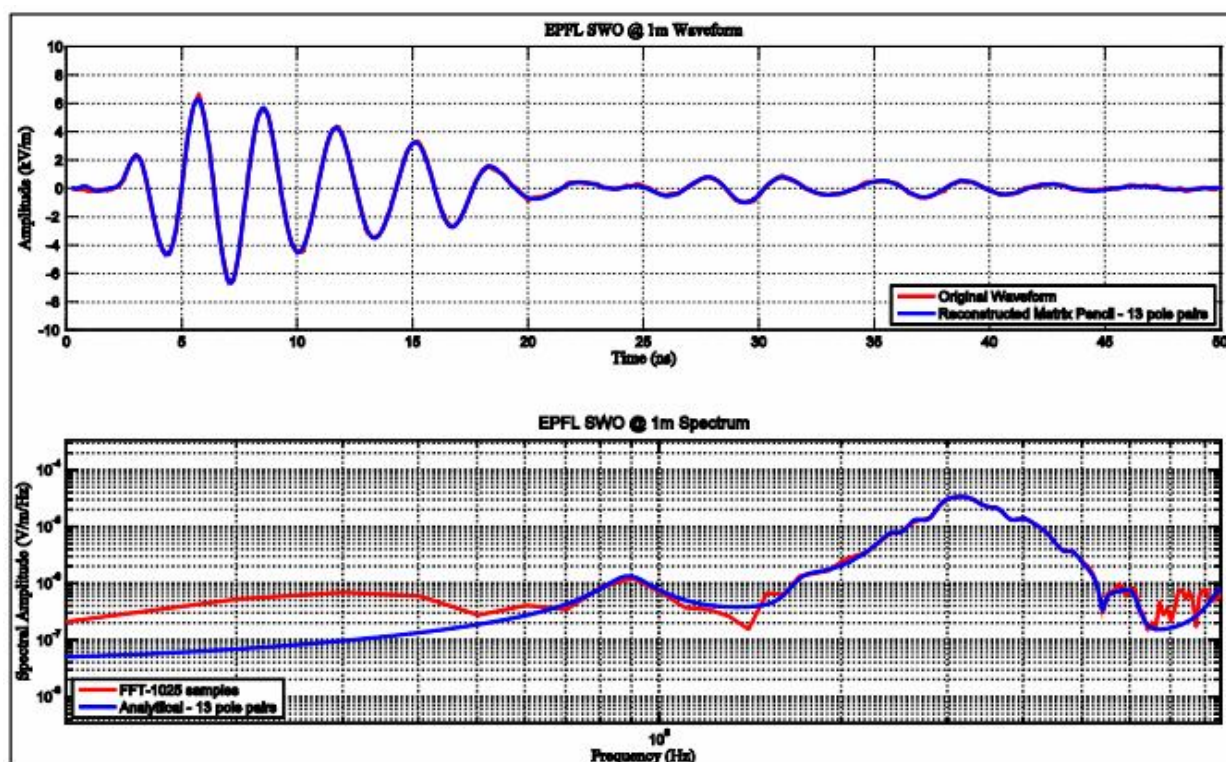


Рисунок 5.4 – Пример реконструкции измеряемого сигнала с МРМ и аналитический расчет его спектра

### 5.1.4 Расчет формы сигнала и параметров его спектра

Если оцифрованная форма сигнала и ее спектр доступны из БПФ или аналитического подхода, следующие параметры могут быть легко вычислены с помощью уравнений, представленных в разделе 3:

1. Пиковая амплитуда ( $N_1$ ).
2. Пиковая производная ( $N_2$ ).
3. Пиковый импульс ( $N_3$ ).
4. Выпрямленный полный импульс ( $N_4$ ).
5. Корень из интеграла действия ( $N_5$ ).
6. Время до пика.
7. Время нарастания 10–90.
8. Максимальная скорость нарастания.
9. FWHM.
10. Время спада.
11. Пиковая спектральная амплитуда.
12. Средняя частота (подход во временной области).
13. Центральная частота (подхода в частотной области).
14. Пропускная способность по уровню минус 3дБ.

15. Средний коэффициент качества (подход во временной области).

16. Коэффициент качества (подход в частотной области).

Расчеты отношения полосы  $br$  сигнала, определяемого уравнением ((3.15)), и полосы 90%  $BW_{90}$ , определяемого уравнением (3.17), непросты. Обе требуют, чтобы спектр сигнала был вычислен в ограниченном числе частотных точек для ограничения времени вычисления алгоритма и получения достаточной точности в вычислении спектра (без потери информации), чтобы частотные пределы  $f_l$  и  $f_h$  можно было правильно вычислить. Если спектр содержит уменьшенное число частот, но резонансы сигнала и важные концентрации энергии упущены, то отношение полосы вычисляется некорректно. Таким образом, необходим метод оценки точности спектров.

#### 5.1.4.1 Оценка отношения полосы с помощью индекса Блюмера

Индекс Блюмера может быть использован для оценки точности измеренного или численно рассчитанного спектра [52]. Индекс служит в качестве инструмента, чтобы определить, является ли информация, содержащаяся в заданном числе точек спектра достаточно хорошей, чтобы воспроизвести каузальный сигнал, или необходимо больше частотных выборок. Индекс Блюмера является получается из преобразования Гильберта, свойств каузальных сигналов и может быть вычислен как

$$B = \left\{ 1 - \frac{\sum_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |\operatorname{Re}\{R(\omega)\}|^2 \Delta\omega - \sum_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |\operatorname{Im}\{R(\omega)\}|^2 \Delta\omega}{\sum_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |\operatorname{Re}\{R(\omega)\}|^2 \Delta\omega + \sum_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |\operatorname{Im}\{R(\omega)\}|^2 \Delta\omega} \right\} \times 100\% \quad (5.6)$$

где  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  – минимальная и максимальная частотные точки в спектре, соответственно, а  $\Delta\omega$  – частотный шаг между последовательными частотными точками. Обратите внимание, что для точного каузального спектра индекс Блюмера равен  $B=100\%$ , так как сумма реальной части спектра должна быть равна сумме мнимой части, удовлетворяющей свойству преобразования Гильберта. Для преодоления вышеупомянутых проблем при оценке отношения полосы исследуемой формы сигнала, использовалась адаптивная неоднородная схема выборки, предложенная в [52]. В этой схеме, в непосредственной близости от спектральных пиков, выбирается большое количество точек данных. С другой стороны, на частотах, где спектр меняется менее быстро, используется более низкая частота дискретизации. Для проверки точности дискретного спектрального изображения выбранной формы сигнала оценивается индекс Блюмера этого спектра. Если индекс находится ниже заданного пользователем порога (обычно около 98–100%), спектр обновляется итеративной схемой до достижения порога. Эта процедура снижает ошибки, возникающие из-за выборки

и/или от усечения спектра в верхнем и нижнем частотных пределах. Как следствие, время расчета отношения полосы значительно сокращается, так как необходимо проверить меньшее количество частотных точек. Более подробную информацию об итеративном выборе частотных точек можно найти в [52].

Чтобы проиллюстрировать использование адаптивной схемы, индекса Блюмера и его влияния на оценку отношения полосы сигнала, вычислен спектр формы сигнала, представленный на рисунке 5.4 с помощью традиционного БПФ и аналитического выражения (5.4) с тремя разными (и уменьшенными) числами частотных выборок: 10, 33 и 106 (см. рисунок 5.5). Образцы были получены итеративно с адаптивной схемой со следующими пороговыми значениями индекса Блюмера: 77%, 97% и 99% соответственно.

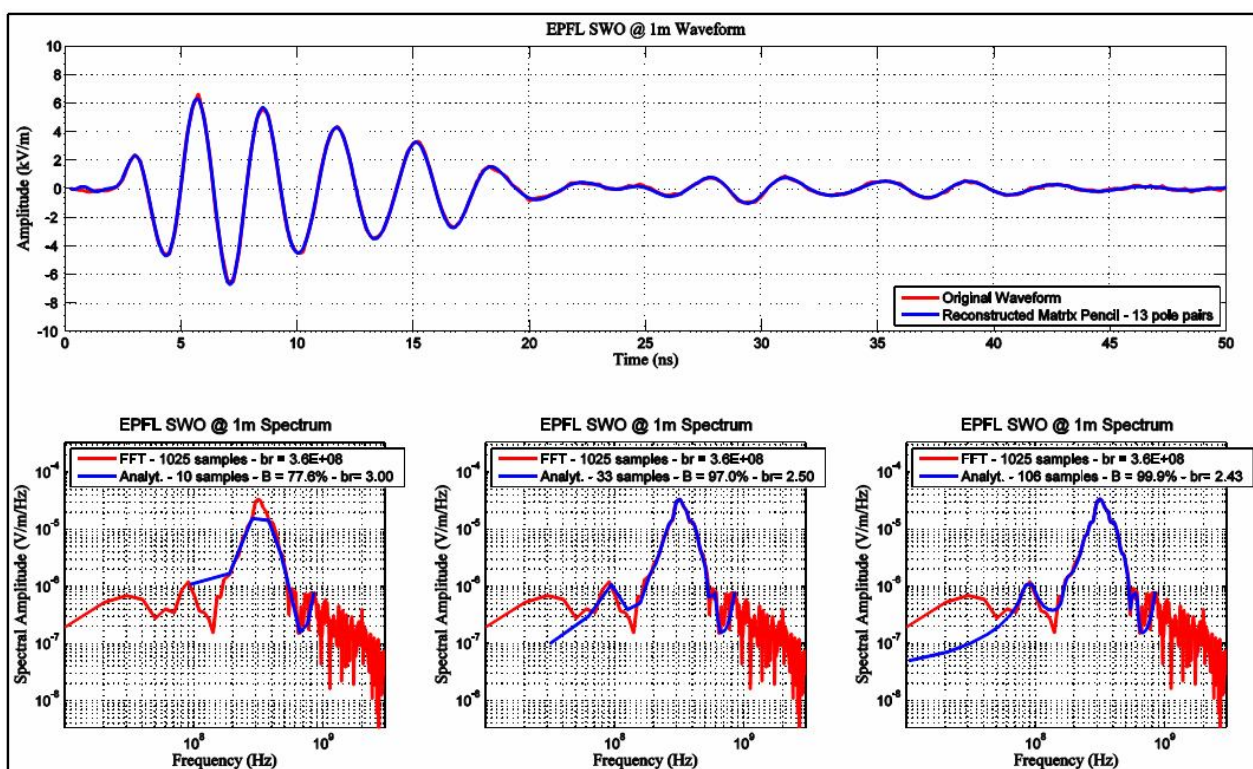


Рисунок 5.5 – Иллюстрация использования индекса Блюмера при расчете отношения полосы

Сводка полученных результатов отношения полосы с помощью БПФ и предложенной схемы с использованием индекса Блюмера приводится в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение результатов отношения полосы, полученных с помощью БПФ и аналитического подхода с индексом Блюмера

Схема	Число выборок	Индекс Блюмера	Отношение полосы
БПФ	1025	–	$3,6 \cdot 10^8$
Аналитика – Блюмер	10	77,6%	3,00
Аналитика – Блюмер	33	97%	2,50
Аналитика – Блюмер	106	99%	2,43

Учитывая затухающе–колебательное поведение сигнала, ожидается сниженное отношение полосы (мезополосный или суб-гипперполосный сигнал). Отношение полосы и результирующая  $BW_{90}$ , оцененные из спектра, полученного с помощью БПФ, рассчитаны некорректно, поскольку схема частотных выборок БПФ является линейной и, следовательно, получены очень большие частотные шаги. Кроме того, могли быть пропущены некоторые важные резонансы. Чтобы уменьшить размер частотного шага, может быть использовано заполнение нулями, но будет увеличено и количество выборок БПФ, что приводит к увеличению времени расчета отношения полосы. С другой стороны, с адаптивной схемой коэффициент полосы оценивается с использованием неравномерных частот, которые выбираются там, где сосредоточена большая часть энергии. Полученные коэффициенты полосы с адаптивной схемой, как и ожидалось, соответствуют мезополосному сигналу. Адаптивная схема дает индекс Блюмера уже 97% с около 33 образцами и 99% со 106 образцами и, следовательно, алгоритм оценки отношения полосы требует гораздо меньше времени, чем с БПФ.

### 5.1.5 Пример сигнальной карты

Наконец, после того, как параметры были рассчитаны, генерируется сигнальная карта. Пример, показывающий сигнальную карту источника [48], представлен на рисунке 5.6. Также добавлена дополнительная информация о названии, годе публикации и типе полосы к содержанию сигнальных карт.



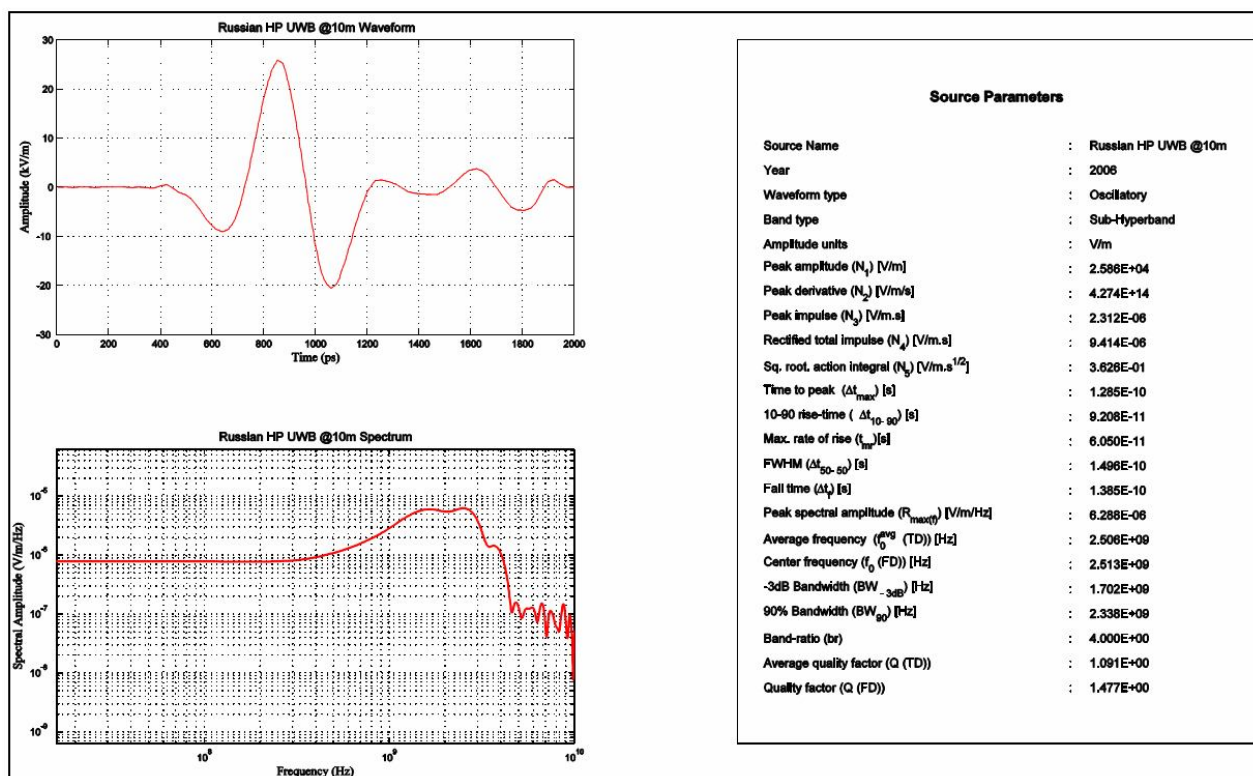


Рисунок 5.6 – Пример сигнальной карты источника, опубликованного в [48]

## 5.2 База данных потенциальных источников ПДЭМВ

Вторая база данных, созданная с помощью этого обзора, представляет собой электронную таблицу, содержащую коллекцию всех выявленных, потенциальных кондуктивных и излучаемых источников и их соответствующие характеристики/признаки.

В коллекцию кондуктивных источников включались следующие характеристики:

1. *Год*: год создания источника (при наличии) или год публикации документа, в котором сообщается об источнике (впервые).
2. *Имя источника*: имя, используемое для идентификации источника в базе данных.
3. *Пиковое Напряжение (кВ)*: максимальное напряжение в коловольтах, которое может быть сгенерировано источником.
4. *PRF (Гц)*: частота повторения импульсов источника в герцах, как описано в уравнении (3.10).
5. *Средняя/центральная частота*: средняя частота источника (только для мезополосных или непрерывных источников, или суб-гиперполосных источников с очень низким отношением полосы).
6. *Тип полосы*: тип полосы источника в соответствии с его коэффициентом полосы, как это было описано в разделе 4.1, если доступна форма сигнала. В остальном, тип полосы согласован с имеющейся в публикации информации.

7. *Уровень технологии*: классификация источника согласно критериям технологической сложности, предложенной Гири и Теше [9].
8. *Уровень затрат*: классификация источника в соответствии с его стоимостью, предложенной Сабатом и Гарбе [16].
9. *Уровень портативности*: классификация источника в соответствии с его уровнем портативности, предложенного ИТУ [17].
10. *Ссылка*: ссылка, из которой получена информация об источнике.
11. *Сигнальная карта*: название сигнальной карты, связанной с источником (если имеется в Приложении А).

Для коллекции излучаемых источников использовались следующие характеристики:

1. *Год*: год создания источника (при наличии) или год публикации документа, который сообщает об источнике (впервые).
2. *Имя источника*: имя, используемое для идентификации источника в базе данных.
3. *Пиковое поле (кВ/м)*: опубликованное пиковое электрическое поле в киловольтах на метр, генерируемое источником на заданном расстоянии.
4. *Испытательное расстояние (м)*: расстояние в метрах, на котором измерено пиковое электрическое поле.
5. *Дальнее напряжение (кВ)*: дальнее поле, генерируемое источником.
6. *Пиковое напряжение генератора (кВ)*: пиковое напряжение в киловольтах, создаваемое основным источником генератора.
7.  $r_{E_p}/V_p$ : отношение дальнего напряжения к пиковому напряжению генератора.
8. *Время нарастания 10-90 (ps)*: время нарастания источника по уровням 10–90 в пикосекундах, полученное из сигнальных карт (если доступно). Иначе, время нарастания приводится из информации в публикации.
9. *PRF (Гц)*: частота повторения импульсов источника в герцах, как описано в уравнении (3.10).
10. *Минимальная частота (МГц)*: минимальная частота в мегагерцах (только для мезополосных или непрерывных источников, или суб-гиперполосных источников с очень низким отношением полосы).
11. *Средняя/центральная частота (МГц)*: средняя частота источника в меггерцах (только для мезополосных или непрерывных источников, или суб-гиперполосных источников с очень низким отношением полосы).

12. *Максимальная частота (МГц)*: Максимальная частота в мегагерцах (только для мезополосных или непрерывных источников, или суб-гиперполосных источников с очень низким отношением полосы).

13. *Тип полосы*: тип полосы источника в соответствии с его отношением полосы, как это было описано в разделе 4.1, если доступна форма сигнала. В остальном, тип полосы согласован с имеющейся в публикации информации.

14. *Уровень технологии*: классификация источника согласно критериям технологической сложности, предложенной Гири и Теше [10] и представленной в разделе 4.4 данной статьи.

15. *Уровень затрат*: классификация источника в соответствии с его стоимостью, предложенной Сабатом и Гарбе [17] и рассмотренной в разделе 4.4 настоящей статьи.

16. *Уровень портативности*: классификация источника в соответствии с его уровнем портативности, предложенного ИТУ [17] и рассмотренного в разделе 4.5 настоящего документа отмечать.

17. *Напряжение постоянного тока первичного источника*: аккумулируемое напряжение постоянного тока генератора Маркса первичного источника генератора импульсов.

18. *Генератор импульсов*: краткое описание импульсного источника.

19. *Выходная антенна*: краткое описание антенны источника.

20. *Ссылка*: ссылка, из которой получена информация об источнике.

21. *Сигнальная карта*: название сигнальной карты, связанной с источником (если имеется в Приложении А).

## 6. Анализ характеристик потенциальных источников ПДЭМВ

Информация, собранная в базах данных, проанализирована с целью выявления возможных тенденций или общих факторов, которые могли бы привести к лучшему пониманию ожидаемых характеристик IEMI-источников. В этом разделе представлены результаты в виде круговых диаграмм и гистограмм из которых можно выявить общие тенденции, обеспечивающие понимание потенциальной угрозы IEMI-источников.

В первой части приводится информация, собранная о кондуктивных источниках, а во второй – об излучаемых.

### 6.1 Кондуктивные источники

В целом, технологии, необходимые для производства переносных высоковольтных источников, в последние 50 или около того лет, достигли значительного прогресса, и выявить тенденции развития довольно сложно, так как для их изготовления с учетом конкретных потребностей имеются небольшие ограничения. Однако стоимость тестовых источников остается умеренной, возможно потому, что они все еще используются только для целей исследований и разработок.

#### 6.1.1 Уровень портативности

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая уровень портативности 21 приведенного в базах данных источника, представлена на рисунке 6.1 Как можно оценить, практически все источники могут перевозиться в портфеле, что подразумевает, что они могут эксплуатироваться нераскрытыми.

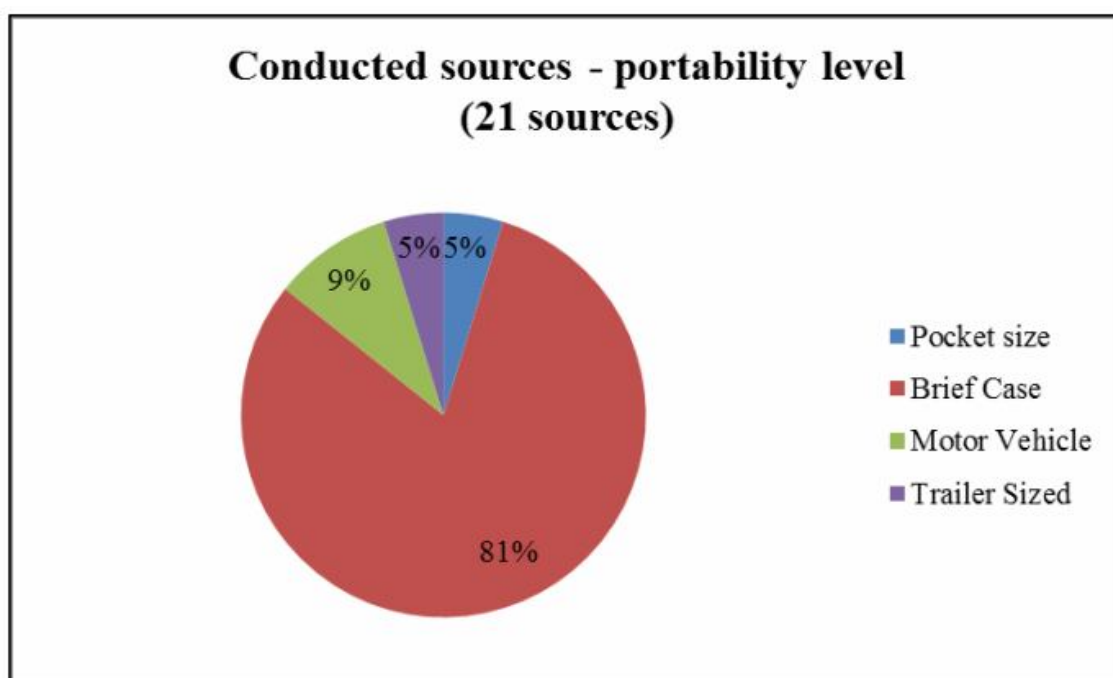


Рисунок 6.1 – Уровень портативности кондуктивных источников

### 6.1.2 Технологический уровень

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая уровень технологий 21 кондуктивного источника, представленного в базе данных, приведена на рисунке 6.2. Около половины из представленных источников требует разработки высоких технологий для их изготовления, предполагая, что половина устройств используются для очень специфичных научно-исследовательских и опытно-конструкторских целей и, следовательно, их доступность ограничена. Другие источники, относящиеся к категории средних и низких технологий, скорее всего, могут быть приобретены у коммерческого производителя.

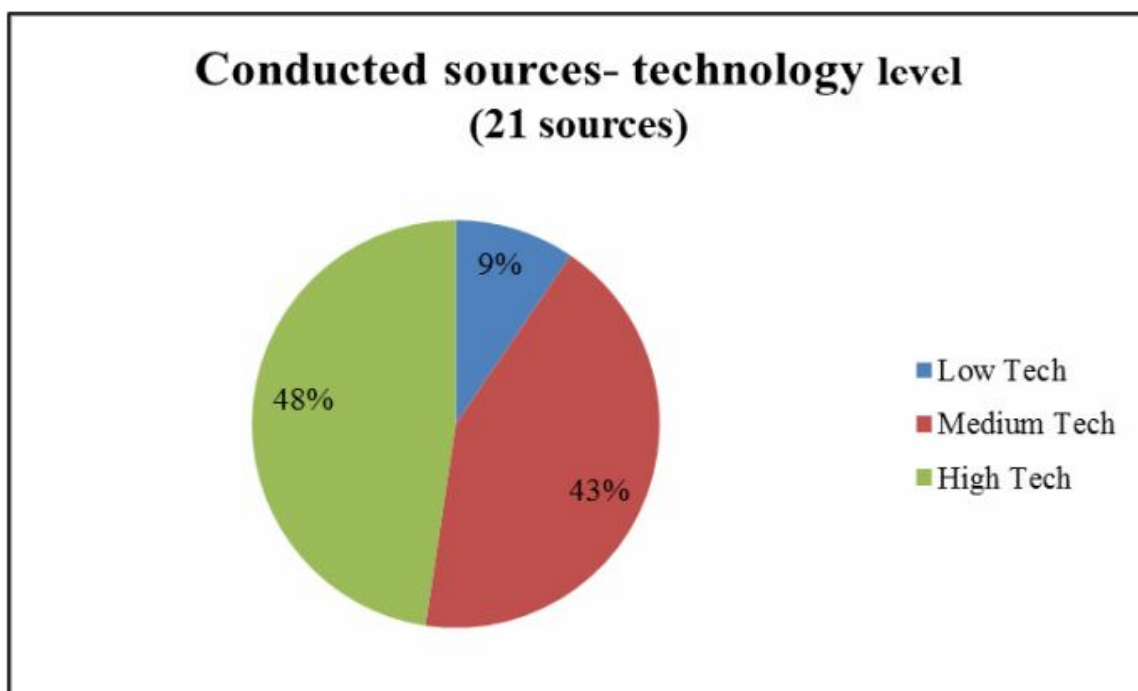


Рисунок 6.2 – Уровень технологий кондуктивных источников

### 6.1.3 Уровень затрат

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая уровень затрат 21 кондуктивного источника из базы данных, представлена на рисунке 6.3. Как и ожидалось из предыдущих анализов, большинство (81%) источников может быть приобретено или изготовлено за умеренную стоимость. Это можно понять как следствие развитости требуемых технологий и доступности исходных компонентов.

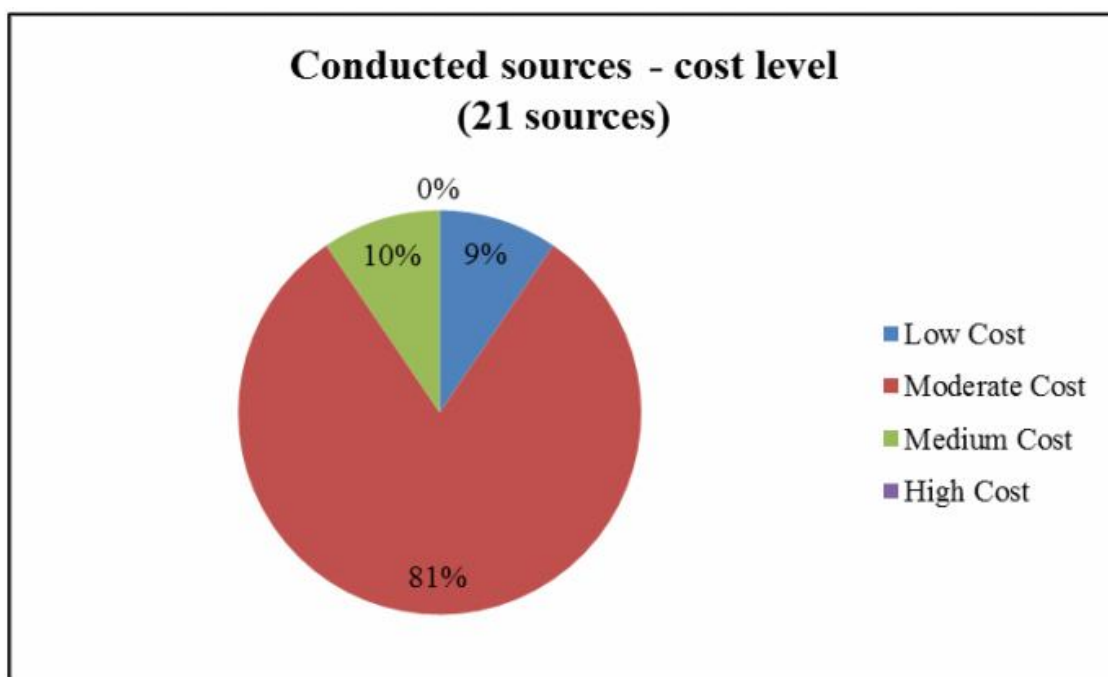


Рисунок 6.3 – Уровень затрат кондуктивных источников

#### 6.1.4 Уровень портативности в зависимости от уровня технологий

Линейный график уровня портативности 21 источника в зависимости от их уровня технологий на рисунке 6.4. Около половины источников, которые помещаются в кейс, являются высокотехнологичными источниками, а другая половина – в основном, относится к умеренным технологиям, и только один из них – к низким технологиям. Только один из изученных источников помещается в карман и использует низкие технологии.

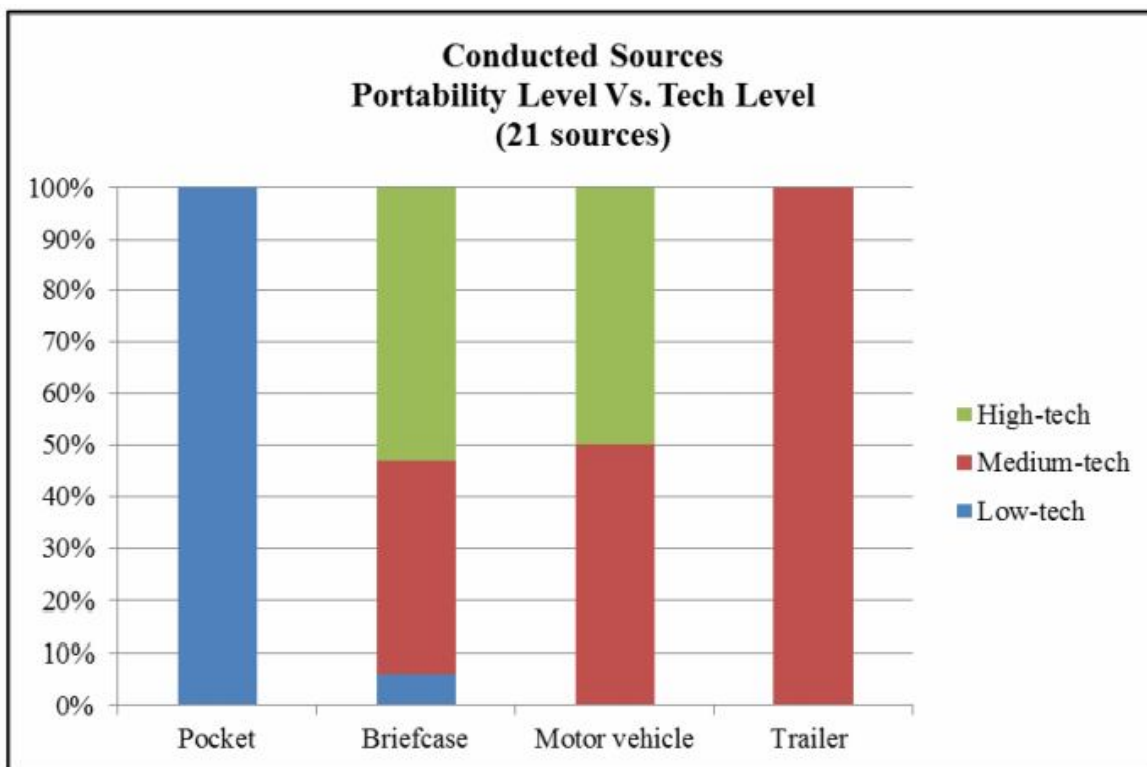


Рисунок 6.4 – Уровень портативности в зависимости от уровня технологий кондуктивных источников

### 6.1.5 Уровень портативности в зависимости от уровня стоимости

Линейный график уровня портативности 21 источника в зависимости от уровня их стоимости приведен на рисунке 6.5. Удивительно, что наиболее портативными источниками являются те, которые обладают низкой или умеренной стоимостью. Это может быть объяснено, по крайней мере частично, тем фактом, что затраты связаны с необходимой энергоемкостью аккумулятора источника, которая, в свою очередь, связана с уровнем транспортабельности. Это означает, что кондуктивные источники могут быть весьма доступными для злоумышленника.

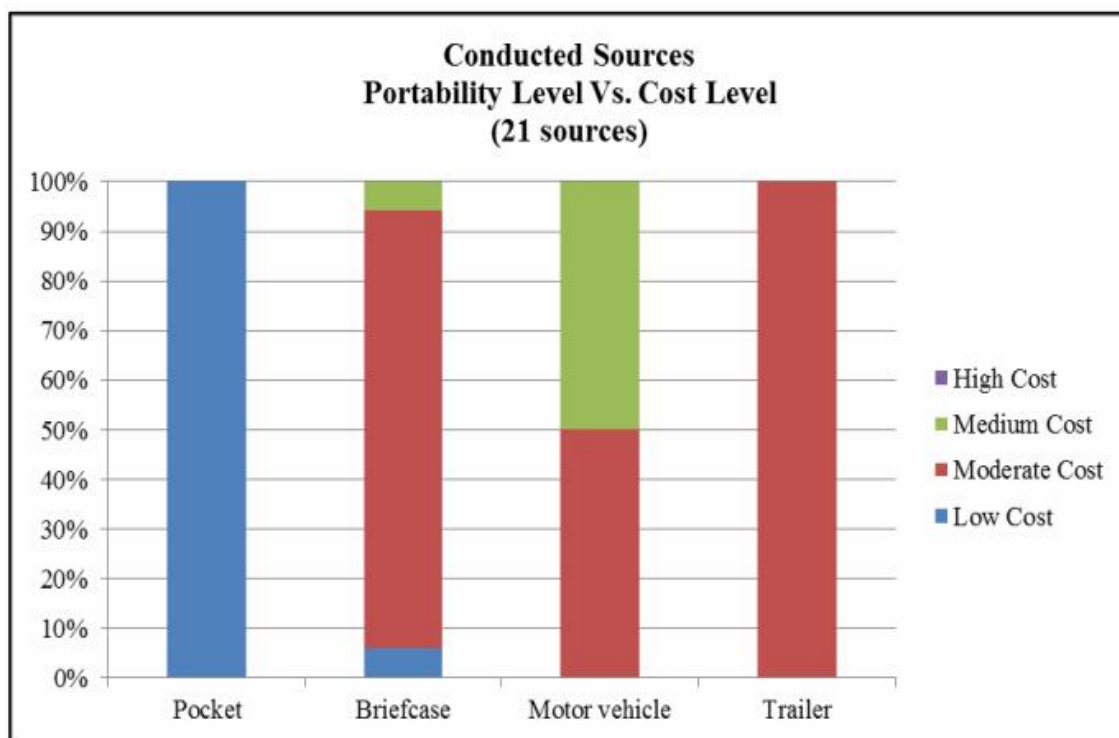


Рисунок 6.5 – Уровень портативности в зависимости от уровня стоимости

### 6.1.6 Уровень портативности в зависимости от пикового напряжения

Линейный график уровня портативности 21 источника в зависимости от их пикового напряжения приведен на рисунке 6.6. Для случая IEM1, уровни кондуктивного напряжения, превышающие несколько киловольт, вряд ли будут эффективно распространяться из-за пробоя изоляции внутри кабелей. Именно поэтому для классификации выбраны источники одного уровня напряжения, свыше 10 кВ. Из линейного графика следует вывод о том, что источники, производящие пиковые напряжения ниже 10 кВ (источники с маркировкой “более 10 кВ”, конечно, включены, так как они могут эксплуатироваться при напряжениях ниже максимально возможных), доступны на любом уровне мобильности. Основным фактором, приводящим к снижению портативности, возможно является увеличение потребности источника в аккумуляторе. Интересно, что в исследуемом наборе данных, процент карманных источников с уровнем пикового напряжения ниже 1 кВ, незначителен.



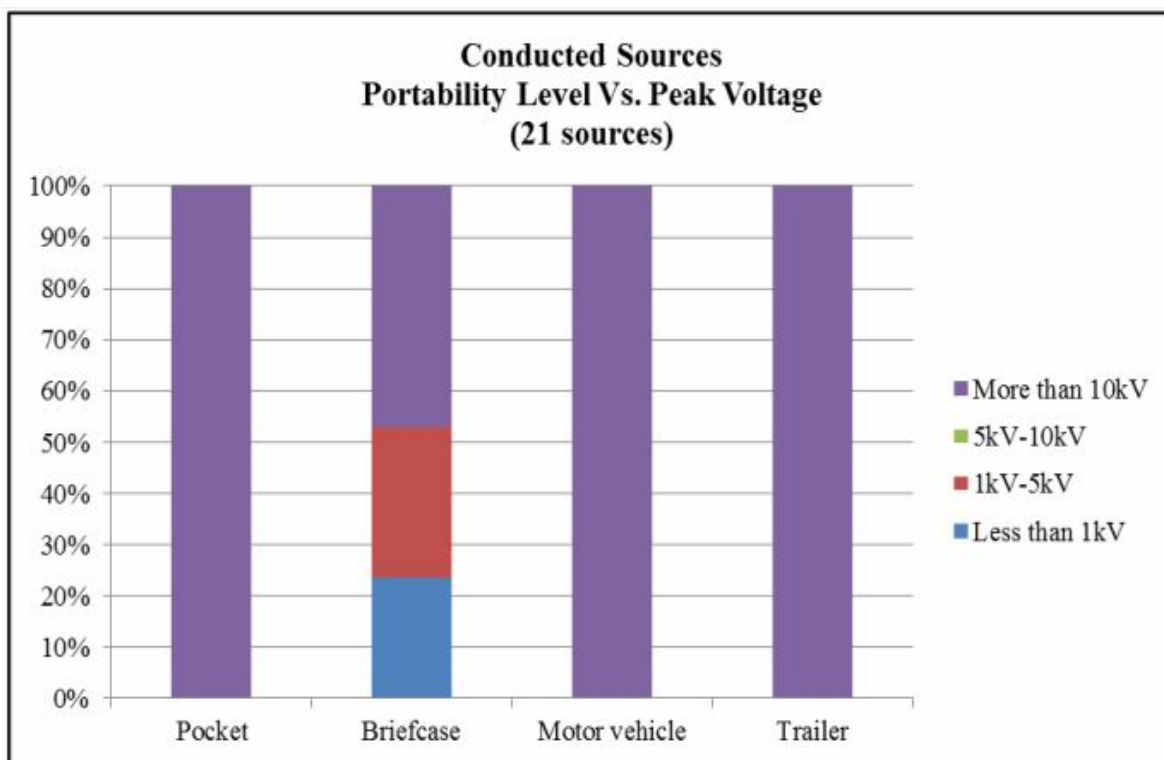


Рисунок 6.6 – Уровень портативности в зависимости от пикового напряжения

## 6.2 Излучающие источники

Излучаемые источники, которые были исследованы, в основном опубликованы в научных журналах, и есть лишь несколько источников, которые можно приобрести у коммерческого поставщика. Это означает, что эти источники, по-прежнему, имеют ограниченную доступность, возможно, из-за необходимых для их производства технологических усилий и испытательного оборудования. Однако из-за развития областей с возможностью производства таких источников, они представляют серьезную угрозу, особенно в связи с тем, что многие из них могут быть легко транспортируемы. Более подробную информацию об исходных характеристиках можно найти в следующих разделах.

### 6.2.1 Уровень транспортируемости

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая уровень портативности, 54 из 55 излучаемых источников базы данных, представлена на рисунке 6.7. Обратите внимание, что из доступной информации существует один источник, для которого уровень портативности не был предусмотрен. Согласно диаграмме, большинство опубликованных источников требует транспортировки на автомобиле или трейлере. Это, конечно, из-за размера антенны и веса первичного генератора. При классификации транспортируемости не учитывается возможность эксплуатации источника внутри транспортного средства. Таким образом, вопрос о его эксплуатации остается открытым. Только несколько (18%) могут

транспортироваться в кейсе, и в опубликованной литературе отсутствуют источники карманного размера.

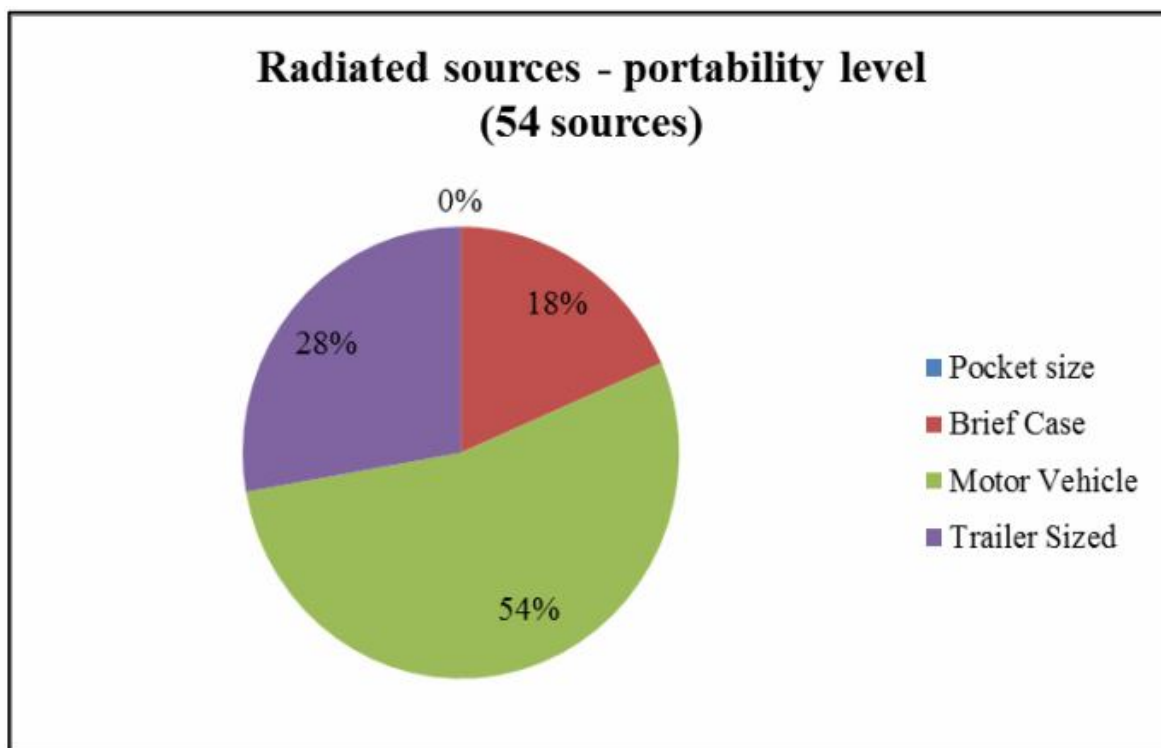


Рисунок 6.7 – Уровень портативности излучающих источников

### 6.2.2 Уровень технологий

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая уровень технологии 55 излучаемых источников базы данных представлен на рисунке 6.8. Этот рисунок иллюстрирует тот факт, что излучаемые источники находятся, все еще, на стадии развития и, следовательно, требуются большие технические усилия и доступность необходимых компонентов ограничена.

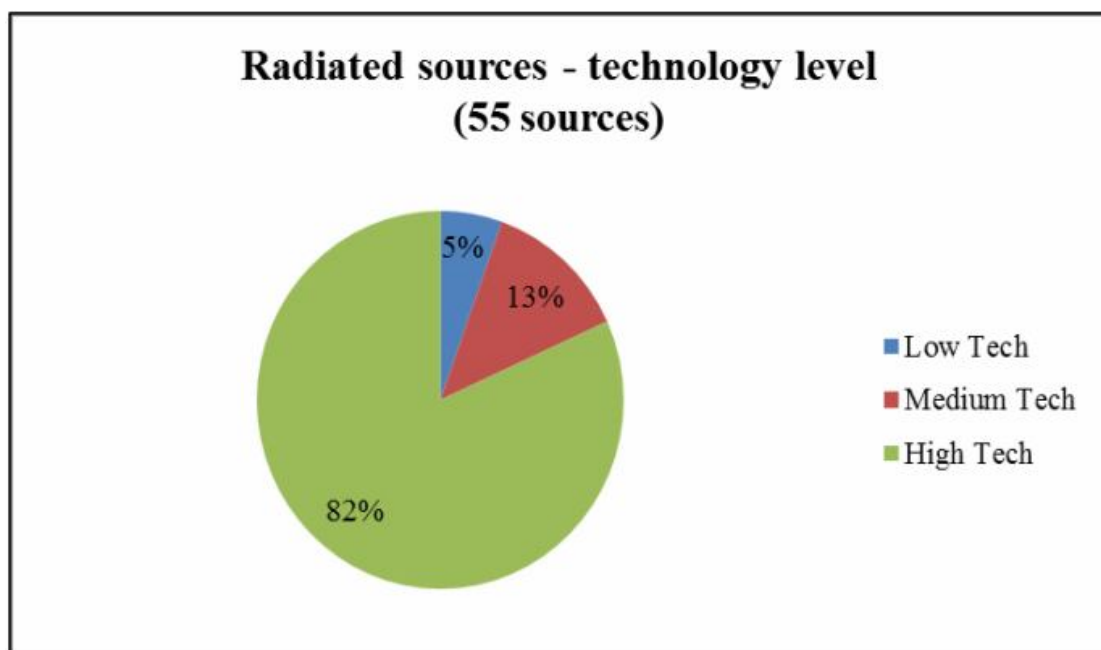


Рисунок 6.8 – Уровень технологий излучающих источников

### 6.2.3 Уровень стоимости

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая уровень стоимости 55 излучаемых источников базы данных представлен на рисунке 6.9. Большинство источников классифицируется как имеющее среднюю и высокую стоимость. Как и ожидалось, уровень затрат отражает высокую изощренность некоторых устройств и ограниченную доступность компонентов. Однако 24% источников можно получить по умеренной стоимости, что подразумевает, что есть некоторые уже развитые инструменты, которые доступны на рынке.

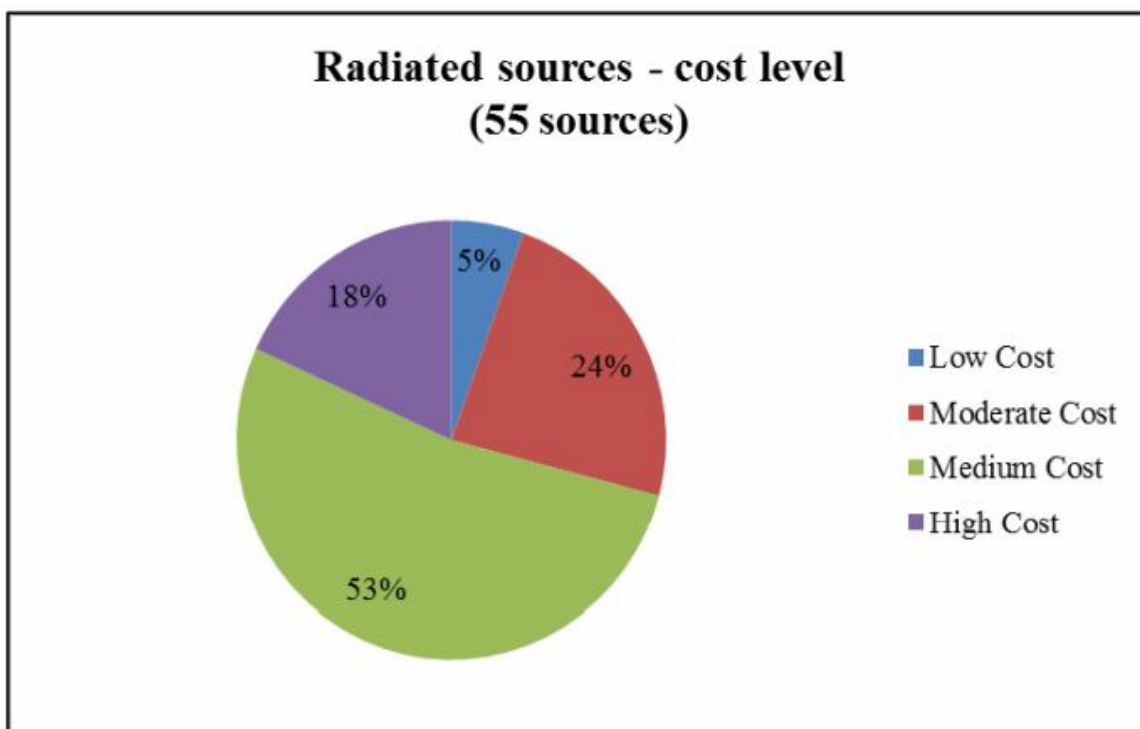


Рисунок 6.9 – Уровень стоимости излучающего источника

#### 6.2.4 Дальнее напряжение

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая дальнее напряжение 35 из 55 излучаемых источников базы данных представлена на рисунке 6.10. Есть 20 источников, для которых дальнее напряжение не может быть получено из доступной информации. Категории дальнего напряжения выбраны, следуя соображениям уровней угроз. Согласно классификации, подавляющее большинство (около 83%) источников вырабатывает большие напряжения между 10 и 1000 кВ, которые на расстоянии 10 м вырабатывают поля в диапазоне 1–100 кВ/м. Эти уровни достаточно высоки, чтобы вызвать ложную информацию или временное нарушение в некоторых системах и, в некоторых случаях, повреждение. Источники, производящие более низкие уровни, могут не предполагать риска для электроники, но они остаются полезными для лабораторных испытаний. Очень малое количество источников (3) вырабатывают более 1 МВ дальнего напряжения. Эти источники наиболее опасны среди источников, дальнее напряжение которых доступно в литературе.

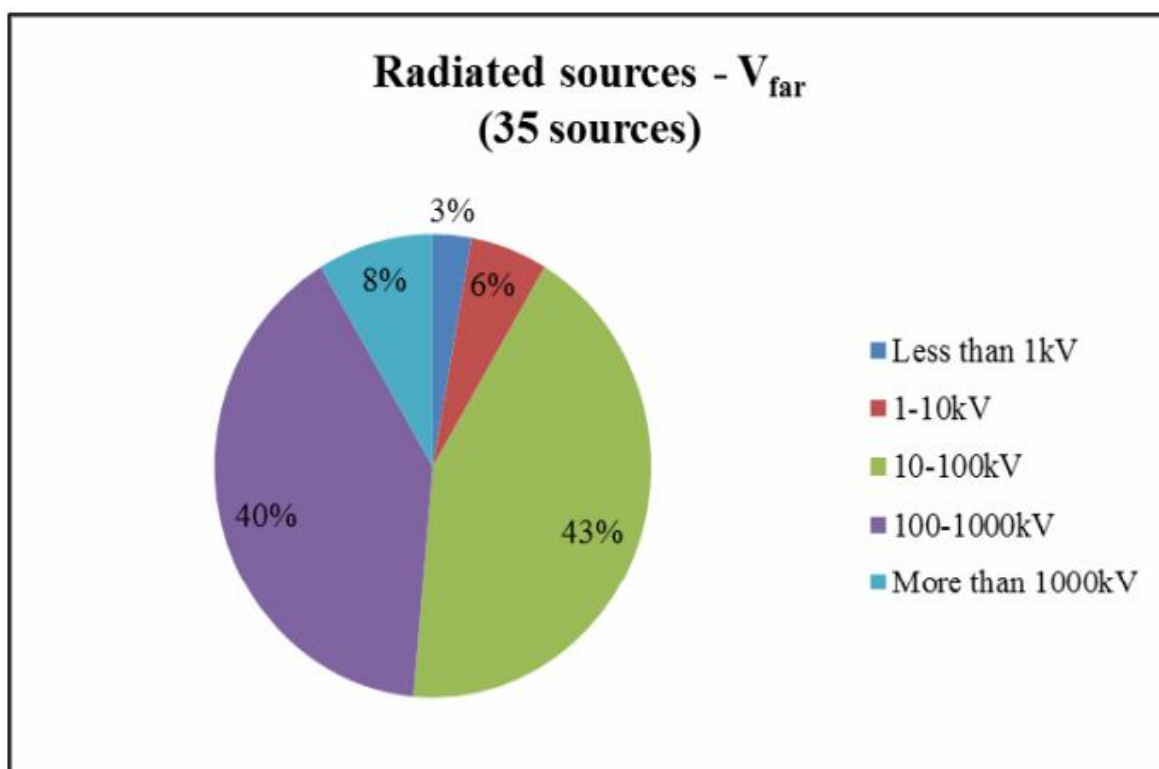


Рисунок 6.10 – Дальнее напряжение излучающих источников

### 6.2.5 Отношение $V_{far}/V_p$

Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая отношение дальнего напряжения к пиковому импульсному напряжению,  $V_{far}/V_p$ , для 35 из 55 излучаемых источников базы данных, представлена на рисунке 6.11. Как упоминается в пункте 6.2.4, существуют 20 источников, информация для дальнего напряжения которых недоступна. Большинство источников демонстрирует отношение между 0 и 2, которое дает доступное представление среднего КПД преобразования. Очень немногие из них имеют соотношение выше 5, которое, как представляется, является пределом конверсии с существующими технологиями.

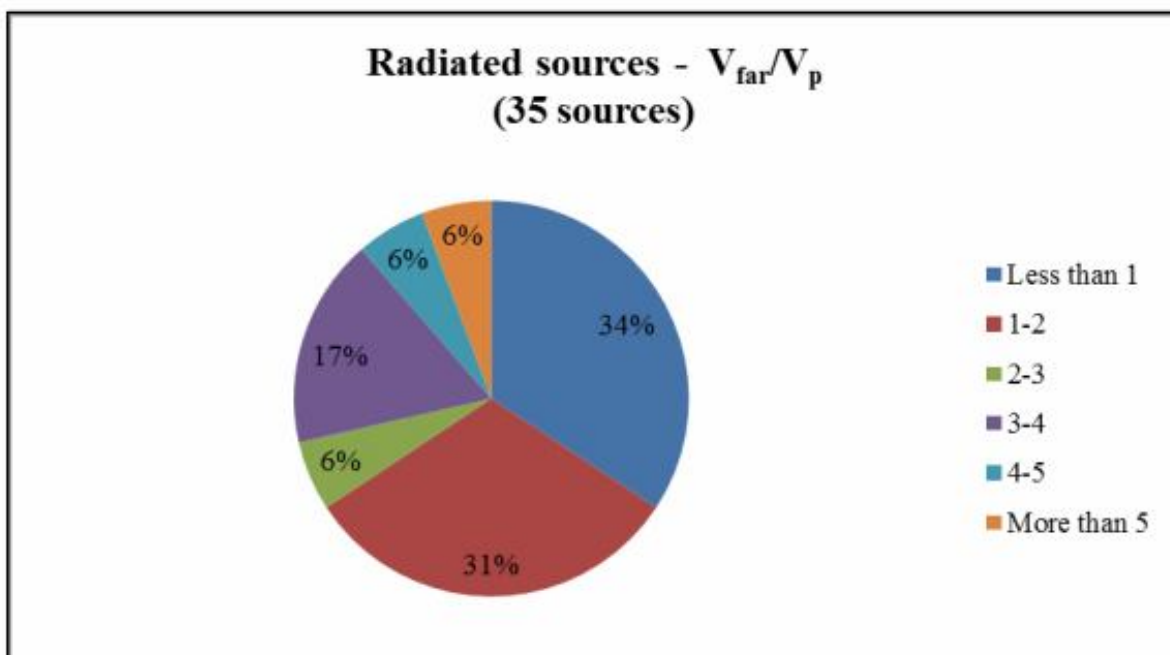


Рисунок 6.11 – Отношение дальнего напряжения к пиковому импульсному напряжению излучающих источников

### 6.2.6 Уровень портативности в зависимости от уровня технологий

Линейный график уровня портативности 54 из 55 источников в зависимости от их уровня технологий приведен на рисунке 6.12. Как упоминалось в пункте 6.2.1, существует один источник, для которого уровень портативности, в доступной информации, не был предусмотрен. Основные выводы, которые можно сделать из графика, можно резюмировать следующим образом: 1) независимо от их технологического уровня, ни один из источников базы данных не может быть классифицирован, как источник карманного уровня транспортируемости; 2) существуют низко и высокотехнологичные источники, которые могут транспортироваться в кейсе, автомобиле или трейлере; 3) только те источники, которые считаются среднетехнологичными, требуют транспортировки небольшим автомобилем. Интересно, что высокотехнологичные источники присутствуют на всех уровнях мобильности (кроме уровня карманной доступности).

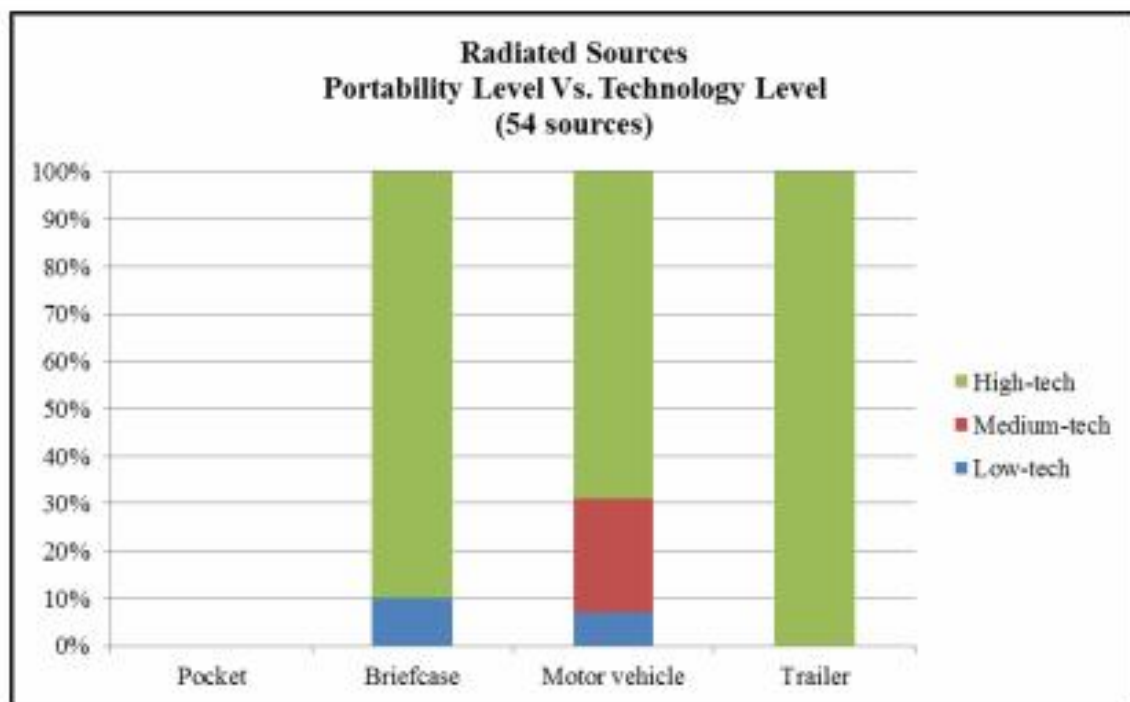


Рисунок 6.12 – Уровень портативности в зависимости от уровня технологий излучающего источника

### 6.2.7 Уровень портативности по отношению к стоимости

Составлен линейный график уровня портативности 54 из 55 источников в соответствии с уровнем их стоимости на рисунке 6.13. Как указано в разделе 6.2.1, из доступной информации, у одного источника уровень портативности не был предусмотрен. Картина аналогичная сравнению между портативностью и уровнем технологии представлена на рисунке 6.13. Из этой цифры видно, что стоимость источника, скорее всего, будет соответствовать средней категории затрат на любом уровне транспортируемости. Тем не менее, только около 10% источников умеренной стоимости попадают в секцию для транспортировки в кейсе, этот процент поднимается почти до 50% для источников соразмерных с транспортным средством. Это означает, что с точки зрения доступности, источники вероятно, будут перевозиться на транспортных средствах, поскольку они могут иметь малую стоимость.

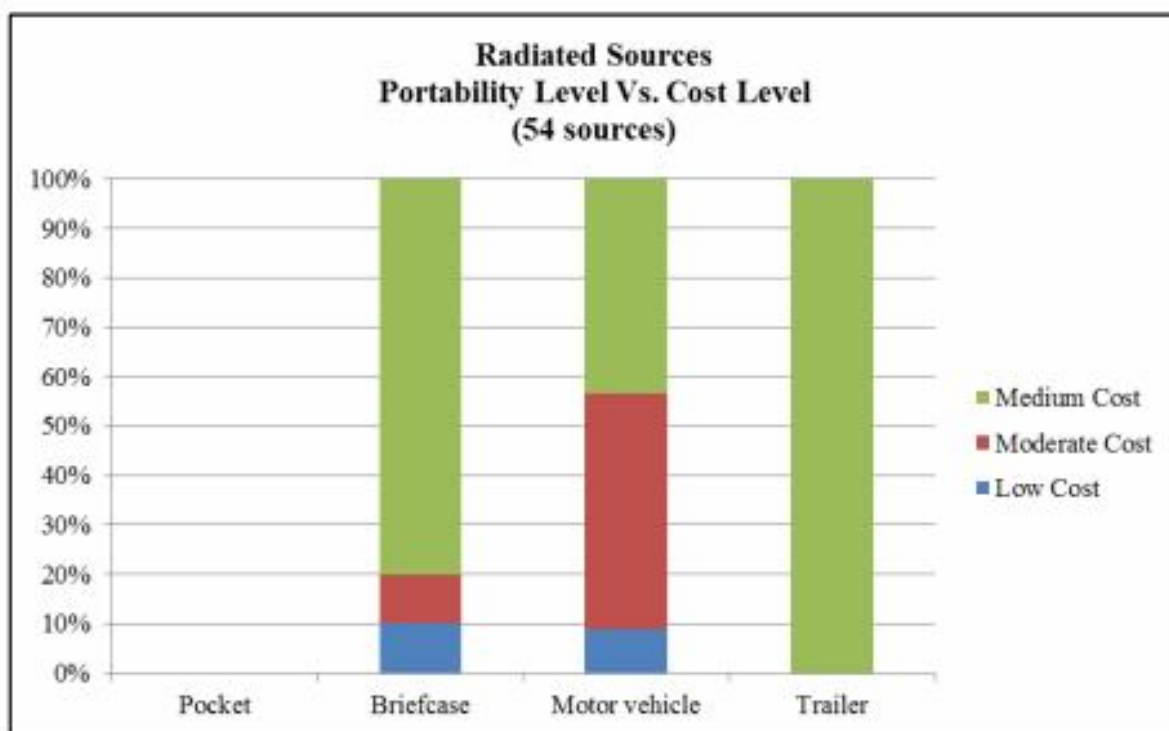


Рисунок 6.13 – Уровень портативности по отношению к стоимости излучающих источников

### 6.2.8 Уровень портативности по отношению к дальнему напряжению

Линейный график уровня портативности 35 из 55 источников в зависимости от их дальнего напряжения на рисунке 6.14. Еще раз обратите внимание на то, что, как и в разделе 6.2.4, имеется 20 источников, для которых из доступной информации не удалось получить дальнее напряжение. Из линейного графика видно, что значительные уровни дальнего напряжения (до 1000 кВ) уже могут генерироваться с источниками, встроенными в кейсы. Это подразумевает высокий уровень опасности для злоумышленников, располагающих необходимыми ресурсами для приобретения такого источника. Как правило, все уровни дальнего напряжения также доступны для источников размером с автомобиль и трейлер.



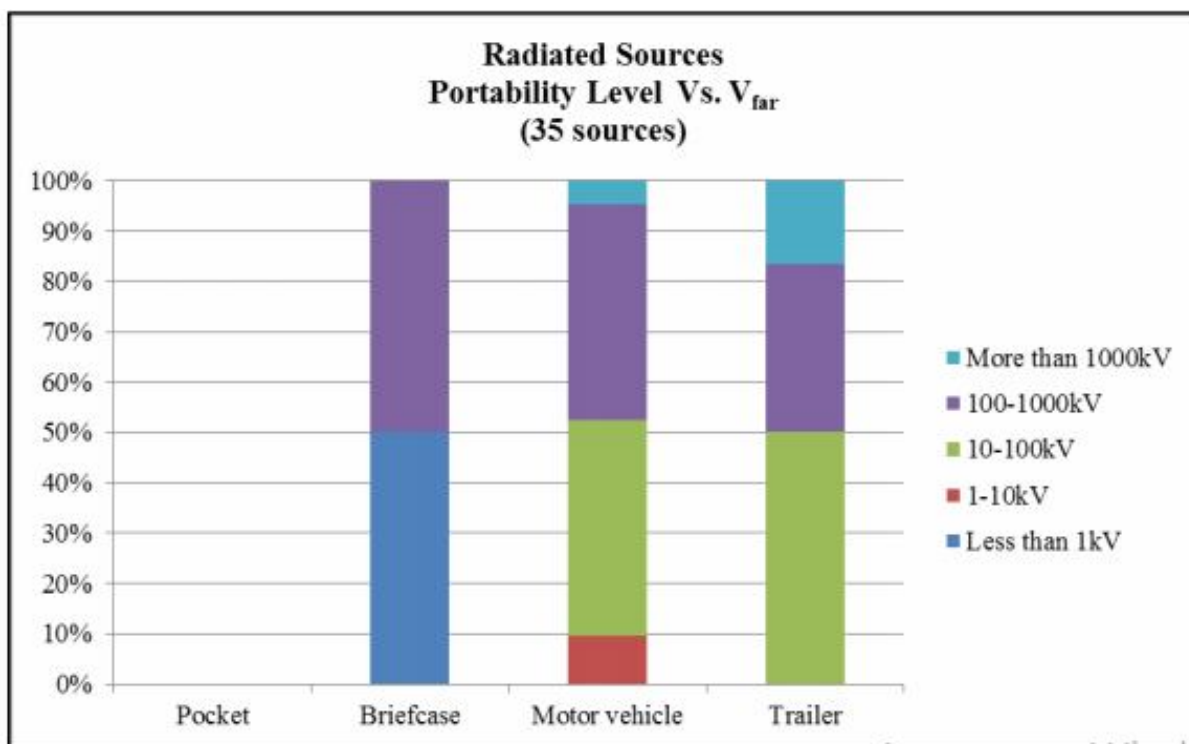


Рисунок 6.14 – Уровень портативности по отношению к дальнему напряжению излучающих источников

### 6.2.9 Тип полосы

Была попытка рассмотреть тип полосы источников, чтобы определить возможные тенденции в их производстве. Процентная круговая диаграмма, иллюстрирующая тип полосы 52 из 55 излучаемых источников базы данных, представлена на рисунке 6.15. Существуют 3 источника, для которых тип полосы не может быть выведен из доступной информации. По данным диаграммы, подобные цифры были найдены для мезополосных, субгиперполосных и гиперполосных источников. Таким образом, получается, что, с точки зрения типа полосы, нет преимущественного источника.

Как и ожидалось, существует мало непрерывных источников, не были включены многие НРМ-источники из-за проблем с транспортируемостью и работоспособностью рассматриваемых в разделе 5. Многие из рекомендованных ссылок, которые включали использование LPM или НРМ труб, были представлены фиксированными установками, и поэтому они не были учтены в базе данных.

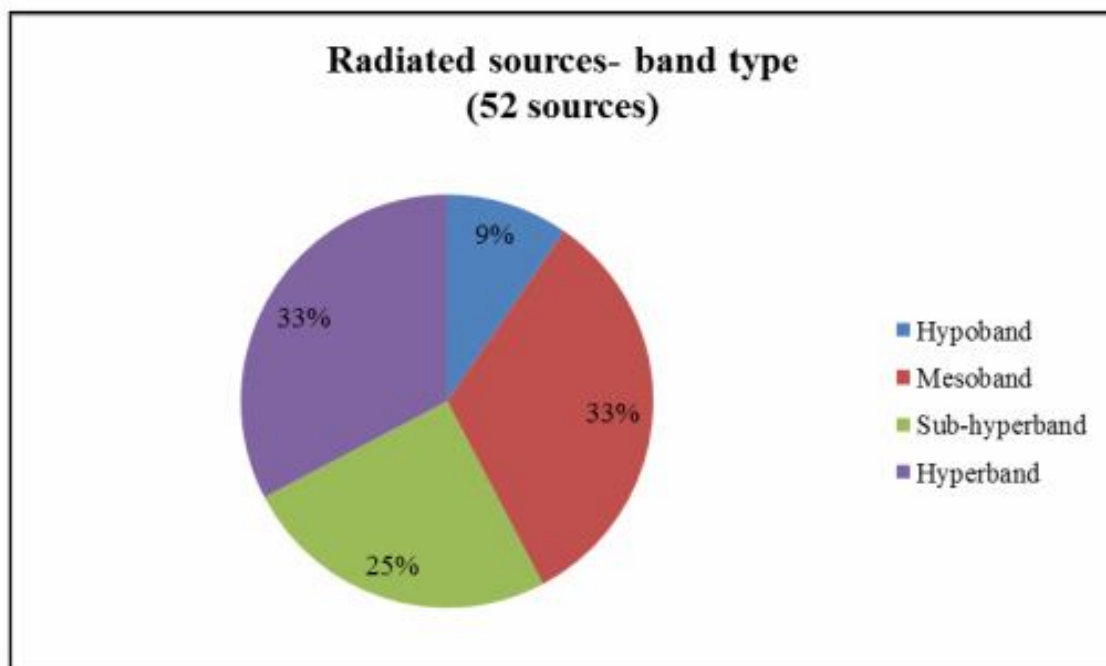


Рисунок 6.15 – Тип полосы излучаемых источников

#### 6.2.10 Год

Чтобы получить представление о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, проведенных в этой области, оценивалось количество источников по сравнению с годом публикации. Линейные графики, иллюстрирующие год публикации 55 излучаемых источников базы данных представлен на рисунке 6.16. Можно отметить, что до 1995 г. было лишь несколько публикаций по этой теме, также как и с 1995 по 2000 гг. В 2000–2010 гг. возросла активность, причем примерно одинаковое число работ было опубликовано в первые пять лет этого периода, как и во втором пятилетнем периоде. В трехлетнем периоде с 2010–2013 гг. наблюдается примерно столько же публикаций, что за 2005–2010 гг., что свидетельствует о повышении интереса к исследованиям и разработкам.

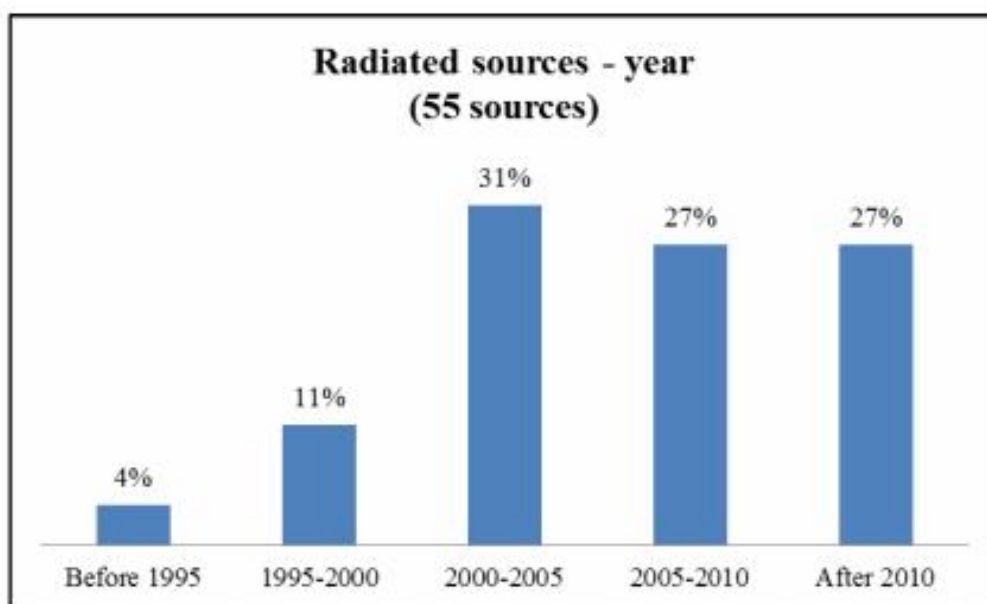


Рисунок 6.16 – Годы публикаций излучаемых источников

#### 6.2.11 Год по отношению к типу полосы

В конце, оценен тип полосы по сравнению с годом публикации, чтобы увидеть, есть ли рост заинтересованности со временем для конкретного вида источника. Линейный график года публикации 52 из 55 источников в зависимости от их типа полосы на рисунке 6.17. Есть 3 источника, для которых тип полосы не может быть выведен из доступной информации. Линейный график показывает тенденцию производства гиперполосных излучателей до 2000 г. Мезополосные источники появляются в 2000 г. и, начиная с 2010 г., большинство зарегистрированных там источников относятся к этой категории. Из анализа форм сигнала было установлено, что у некоторых осциллирующих источников очень низкое отношение полосы, между 3 и 4. Таким образом, часть суб-гиперполосных источников периода 2005–2010 гг. могут добавиться к мезополосным источникам из-за приближающихся к ним характеристик. Наконец, как уже отмечалось ранее, за последние десятилетия произошло значительное развитие узкополосных источников, однако из-за их повышенной мощности и низкой транспортируемости, в базе данных их было рассмотрено очень мало, и они не появлялись в литературе с 2010 г.

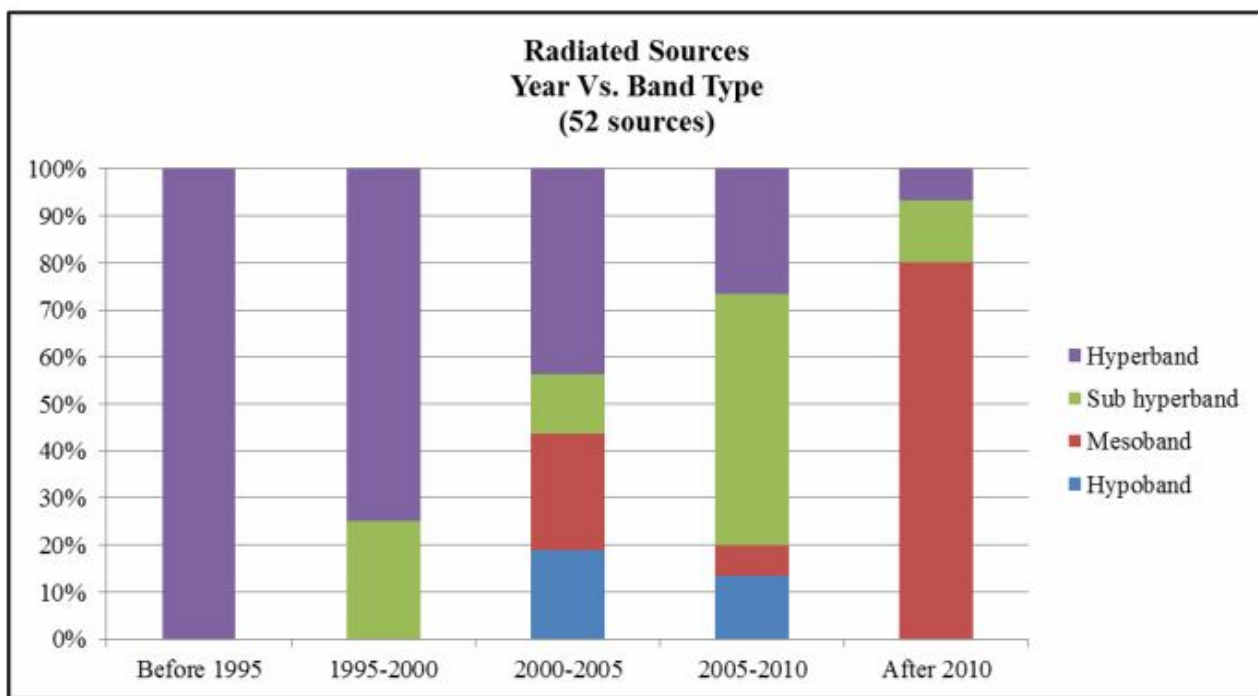


Рисунок 6.17 Год публикаций по отношению к типу полосы излучаемых источников

## 7. Обзор ожидаемых пределов потенциальных источников ПДЭМВ и их текущих технологий

Изучив тенденции, основанные на собранной информации об источниках, можно понять типы угроз, которые могут быть реализованы с помощью современных технологий и рынков. Эти тенденции, безусловно, будут изменены, как только увеличится транспортируемость источников или снизятся затраты из-за технологического усовершенствования или роста рынка. Интерес к генерации интенсивных полей в диапазоне между несколькими сотнями мегагерц и несколькими гигагерц объясняется ожидаемыми размерами ручной электронной аппаратуры и, так называемым, законом Баума [6]. Однако, IEMI-излучатели также могут быть созданы на более высоких частотах (возможно, с меньшим воздействием на электронику) или на более высоких уровнях.

Генерация НРЕМ-полей имеет фундаментальные пределы из-за физических ограничений (соответствующих текущим технологиям), которые будут кратко рассмотрены в этом разделе. При рассмотрении вопроса о целесообразности использования потенциальных IEMI-источников, наиболее важным ограничением, пожалуй, является физическое, а не текущее технологическое ограничение. Однако думать об одном без другого довольно сложно.

Существует много схем генерации НРЕМ-полей. Блок-схема с описанием простой схемы НРЕМ-генерации представлена на рисунке 7.1.

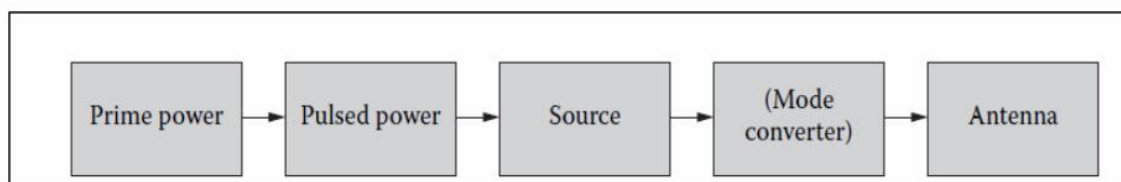


Рисунок 7.1 – Схема генерации НРЕМ-полей [47]

Одна из наиболее распространенных установок начинается с первичного источника постоянного тока, который заряжает банк конденсаторов, который в свою очередь запитывает генератор Маркса или индуктивный генератор, составляющий так называемый первичный источник. Выход первичного источника подается на последующие каскады формирования импульсов, в которых уменьшается время нарастания и получается нужная форма сигнала импульсной энергии. На этой точке, в зависимости от применения, каскад импульсной энергии может запитывать микроволновой резонатор, НРМ-лампу, обостритель той или иной формы, выход которого преобразует режим и подключен к выходной антенне. Для

кондуктивного источника, выход сразу подсоединяется к цели, или к соответствующему индуктивному или емкостному щупу, который влияет на цель.

## 7.1 Технологические пределы

Электрическое поле, проходящее по каждому из каскадов цепи НРЕМ-генерации, ограничено так называемым пределом пробоя газа для коротких импульсов (грубо, менее 1 мкс). Для более длительных импульсов, ключевой вопрос – это нагрев стенок (см., пример, с. 124 из [47]). Амплитуда электрического поля внутри цепи генерации будет зависеть от геометрии волновода и первичного сигнала возбуждения. Когда общее поле, распространяющееся вдоль газонаполненной среды, превышает предел пробоя, создается плазменный канал, который способен выдержать высокое значение тока, и ток проводимости в газе закортит исходное поле. В общем, разряд развивается тогда, когда ускоренные электроны (за счет высокоинтенсивного электрического поля) способны производить крупные электронные лавины. Если эта волна достаточно интенсивна, то ток в усиленном канале увеличивается, становясь неустойчивым до полного пробоя [53].

Поле пробоя воздуха и других типов газов широко изучено для приложений коммутации [54–57] и НРМ-генерации [58]. Для воздуха при стандартных условиях температуры и давления, при условии однородного поля (например, поле постоянного тока в параллельном расположении пластин), поле пробоя приблизительно равно 3 МВ/м. Изучение пробоя в условиях, медленно меняющегося, неоднородного поля является более сложным, и его анализ должен быть отработан отдельно для каждого давления газа и конфигурации поля. В литературе есть некоторые аналитические формулы для поля пробоя между каноническими наборами электродов (например, сферы, цилиндры, цилиндрические пластины и т.д.) для различных газов с приемлемым согласованием с экспериментами [55, 59].

Данные пробоя для различных газов показывают более высокие поля пробоя для импульсов меньшей длительности. Например, пробой воздуха при атмосферном давлении в 2,3 раза выше для импульса в 10 нс, чем для постоянного тока [55]. В общем, порог пробоя 3 МВ/м для условий однородного поля обычно используется в проектировании НРЕМ-антенны с коэффициентом запаса 3 (т.е. 1 МВ/м на выходе антенны), чтобы учесть возможные точки увеличения поля, которые могут привести к пробоему газа [36]. Если необходимы более высокие значения поля, то антенны обычно помещаются в газ SF<sub>6</sub> [15, 18] который пробивается около 9 МВ/м и имеет постоянную распространения аналогичную воздуху.

### 7.1.1 Гиперполосные излучатели

Дальнее электрическое поле гиперполосных НРЕМ-излучателей, с апертурными антеннами в качестве выхода (например, HIRA [8]), определяется скоростью нарастания управляющего напряжения и размером апертуры. Сложность построения высоковольтных переходных генераторов, создающих сотни киловольт со временем нарастания порядка сотен пикосекунд, составляет технологический предел для генерации таких сигналов. Высокопроизводительные обостряющие зазоры выдерживают давление около 100 атмосфер и выдерживают Е-поля в диапазоне мегавольт на сантиметр. Считается, что максимальная производная, которую можно было бы ожидать от газового коммутатора, находится в порядке  $10^{15}$  В/с [8, 60]. Предполагая максимальную производную  $10 \cdot 10^{15}$  В/с, можно получить грубую оценку сильнейшего/быстрейшего, достижимого генератора для гиперполосных излучателей. Например, самый быстрый 100 кВ генератор будет переключаться не менее 10 пс и самый быстрый 1 МВ генератор должен замыкаться не менее, чем за 100 пс.

Как уже упоминалось в разделе 4.2, одним из самых мощных переходных генераторов, доступных для покупки является JOLT [18]. Эта система способна обеспечить излучаемым дальним полем с временем нарастания около 80 пс, длительностью порядка 100 пс и дальним напряжением 5,3 МВ. Для достижения этих результатов, JOLT управляется генератором в 1 МВ, переключающимся примерно за 200 пс ( $dV/dt$  около  $5 \cdot 10^{15}$  В/с). В близком поле, эта система смогла произвести до 800 кВ/м [36].

### 7.1.2 Мезополосные излучатели

Мезополосные генераторы могут быть построены из четвертьволновых коммутируемых генераторов, заряжаемых напряжением постоянного тока [13]. Эти системы также будут ограничены вышеупомянутыми ограничениями переключения. Кроме того, учитывая ожидаемый размер этих устройств, управление высоким напряжением становится проблемой. Также, если желаемые частоты колебаний четвертьволновых осцилляторов превышают гигагерцовый диапазон, то конструкция приборов усложняется, так как механические требования к точности построения металлических профилей при таких малых габаритах стоят дорого и не всегда выполнимы.

Одной из наиболее мощных опубликованных мезополосных систем на основе коммутационного осциллятора является так называемая система MATRIX [7]. Эта система может быть заряжена до 150 кВ и она осциллирует между 180 МГц и 600 МГц. Расчетное дальнейшее напряжение (произведение  $rE_{\text{пик}}$ ) исходной системы было около 90 кВ. Новые версии системы включают в себя осцилляторы, работающие на более высоких частотах (1 и 2 ГГц), но заряжаются при более низких напряжениях постоянного тока (50–65 кВ) [29, 61] из-за

вышеупомянутого ограничения пробоя. Еще один способ получить мезополосные НРЕМ излучаемые формы сигналов подсоединить проводную антенну к генератору импульсов высокого напряжения. Одни из самых мощных опубликованных систем, DIENL кейс-генераторы [62], способные производить около 225 кВ/м на 1 м, осциллируют на центральной частоте 350 МГц. Эти системы используют антенну с перестраиваемым сердечником, запитываемую импульсным генератором Маркса напряжением 600 кВ. Основной технологической проблемой таких систем является размещение генератора Маркса в таком малом объеме ( $100 \cdot 55 \cdot 82 \text{ см}^3$  согласно [62]).

В [15] была представлена более крупная, но все же переносимая мезополосная излучаемая система, основанная на возбуждении проводных антенн мощным генератором Маркса. Система была способна генерировать импульс 2 МВ/300 пс, чтобы управлять набором спиральных антенн с 9 различными центральными частотами в диапазоне от 200 МГц до 6 ГГц. Из-за проблем с пробоем на интерфейсе генератора/антенны, спиральные антенны должны быть изолированы в обтекателе газом SF<sub>6</sub>.

### 7.1.3 Узкополосные излучатели

Среди IEMI-излучателей, так называемые маломощные СВЧ источники и СВЧ излучатели высокой мощности являются наиболее опасными, так как они могут вызвать необратимые последствия из-за нагрева полупроводников. СВЧ устройства высокой мощности определяются как те, которые превышают 100 МВт пиковой мощности и охватывают диапазон частот между 1 и 300 ГГц [8,47]. Обычные лампы могут работать в непрерывном режиме до нескольких мегаватт выходной мощности. Если требуется более высокая выходная мощность, НРМ-излучатели могут быть адаптированы, чтобы излучать импульсы непрерывной волны короткой длительности, в диапазоне от сотен наносекунд до нескольких микросекунд (скважность  $10^6$ ), и достигать выходной мощности несколько гигаватт. Учитывая размер и вес необходимого источника питания и механизмы охлаждения таких генераторов, такие источники очень трудно транспортировать, и они, как правило, устанавливаются в военных транспортных средствах или больших инфраструктурах, таких как аэропорты или военные базы.

Чтобы понять позиционирование СВЧ-ламп малой и большой мощности, сравнение пиковой и средней мощности для обычных и мощных ламп представлено на рисунке 7.2. Можно видеть, что обычные трубки (затененные в светло-сером цвете) охватывают большой диапазон в графике, в то время как мощные лампы (затененные в темно-сером цвете) для получения существенных уровней средней мощности не были разработаны. Черные прямые



линии проведены для определения границ между коэффициентами заполнения 1,  $10^{-2}$ ,  $10^{-4}$  и  $10^{-6}$ .

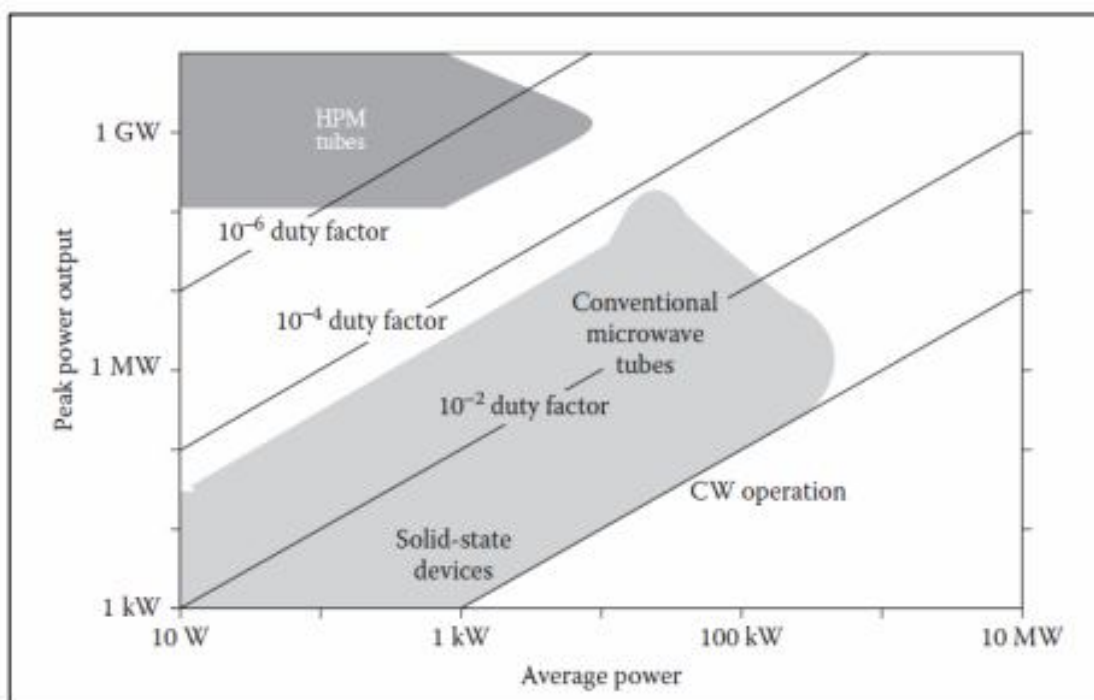


Рисунок 7.2 – Пиковая мощность в зависимости от средней для СВЧ-источников малой (LPM) и большой НРМ мощности [47]

Естественно, ожидаемое пиковое  $E$  поле НРМ-излучателей ниже, чем у гиперполосных или мезополосных излучателей. В конце 90-х годов считалось, что НРМ-устройства имели фундаментальное ограничение по пиковой мощности приблизительно в 10 ГВт и энергией импульса 1 кДж [47, 63]. Однако, считается, что с помощью фазовой синхронизации, несколько источников могут увеличить общий уровень устройства. Например, выходные уровни возможного оружия с множеством импульсов, рассматриваемого Тейлором и Гири в [63], были пиковой мощности 10 ГВт, длительностью импульса 100 нс и энергией импульса 1 кДж при частоте повторения 1 кГц. Окончательные пределы пиковой мощности НРМ-источника не известны. Они определяются компромиссами между пробоем (multipactor), выбором режимов, и интенсивным взаимодействием электронов и поля.

На рисунке 7.3 представлен график пиковой мощности, генерируемой типичными образцами источников высокой мощности [47]. Оказывается, пиковая мощность многих источников падает как  $Pf^2$  на высокой частоте.

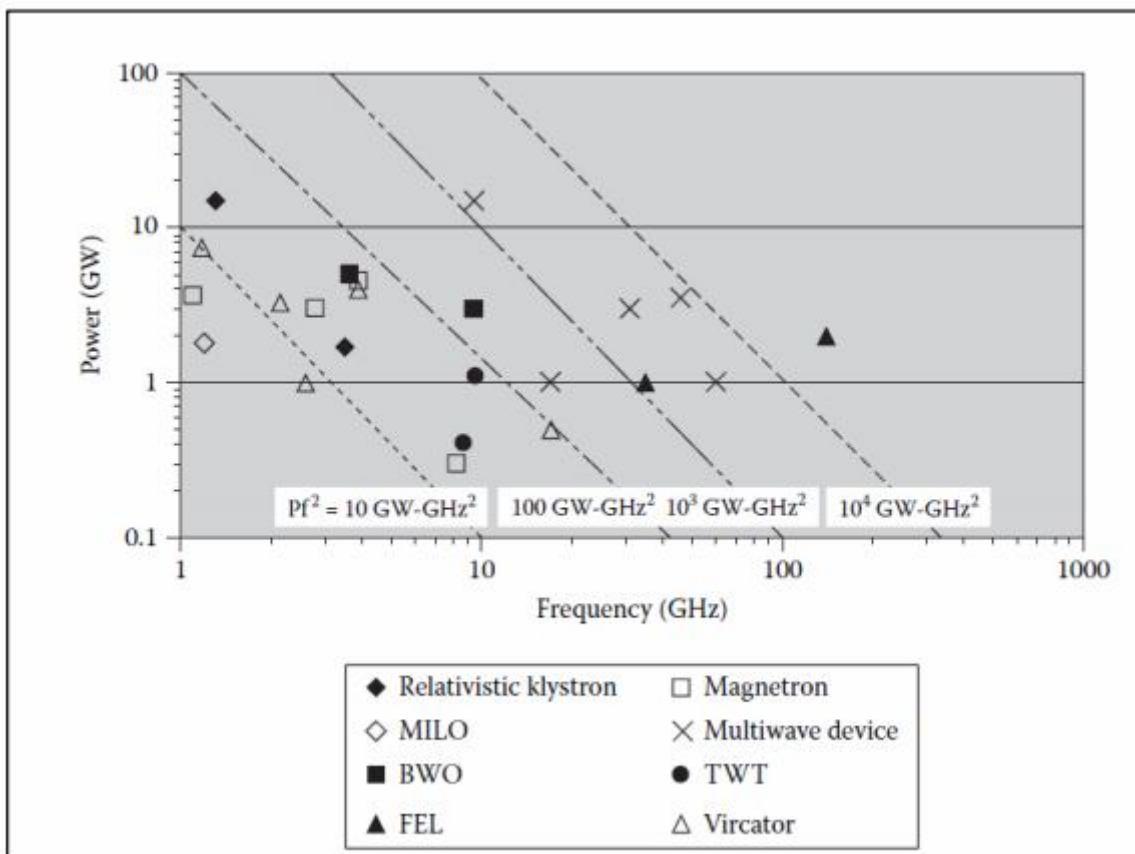


Рисунок 7.3 – Пиковая мощность НРМ-источников [47]

Одними из самых мощных и простых для построения НРМ-источников является осциллятор с виртуальным катодом или виркатор. Виркатор является весьма привлекательным источником для ИЕИ с учетом того, что это перестраиваемый генератор непрерывной волны в диапазоне 1–10 ГГц, он не требует приложенного магнитного поля и является низкоимпедансным устройством (обеспечивает высокую мощность при низком напряжении). Однако, это источник с очень низким КПД (около 1–15%) и он традиционно используется с взрывчатыми веществами, например в виде электрического генератора одиночного импульса на выходе, для уменьшения площади.

## 8. Заключение

В работе представлены исследования и классификация потенциальных источников ПДЭМВ, которые были собраны из доступных публикаций. Исследование включает расчет формы сигнала и спектральных параметров напряжения, измеренного на выходе кондуктивных источников и электрического поля на заданном расстоянии от излучающих источников. Сигналы были оцифрованы из оригинальных работ, и для получения параметров была создана программа обработки сигналов.

Предложен альтернативный метод представления оцифрованных сигналов в виде разложения комплексных экспонент, из которых можно аналитически вычислить преобразование Фурье. Этот альтернативный метод облегчает расчет спектральных параметров сигналов, поскольку спектры могут быть рассчитаны в произвольных частотных точках. Также показано, как улучшить время расчета отношения полосы сигналов с помощью индекса Блюмера. Из этих результатов создан набор сигнальных карт, каждый из которых содержит сводку характеристик формы сигнала, включая ее спектральные параметры. Также основные характеристики источников собраны в электронную таблицу и классифицированы в соответствии с предлагаемыми критериями оценки прочности, доступности и переносимости источников, которые были представлены в разделе 4 настоящей статьи.

Информация из таблиц использовалась для создания круговых диаграмм и линейных графиков, иллюстрирующих некоторые тенденции и характеристики анализируемых кондуктивных и излучаемых источников. Установлено, что потенциально кондуктивные IEMI-источники являются более доступными, чем излучаемые источники. Из-за развития рынка и снижения требований к частоте, эти источники являются коммерчески доступными от различных поставщиков, испытания ЭМС. Уровни напряжения в диапазоне нескольких киловольт могут быть достигнуты с источниками, демонстрирующими все заданные уровни портотивности (в том числе карманные), а цены их приобретения остаются умеренными для большинства кондуктивных источников. Таким образом, они могут рассматриваться как вероятные для развертывания злоумышленником ПДЭМВ.

С другой стороны, излучаемые источники, по-видимому, все еще находятся на стадии разработки и доступны для покупки только в качестве испытательных источников. Они, как представляется, требуют, по крайней мере, транспортного средства для транспортировки, и, согласно классификации, типичные затраты на такие источники остаются высокими из-за требуемых высоких технологий в реализации и испытаниях. Тем не менее, уже есть некоторые прототипы, которые могут транспортироваться в кейсе и выходы на уровне поля способны теоретически производить сбои и повреждения, если достаточно близки, в

электронике. Тенденция к производству широкополосных излучателей была выявлена в начале 2000-х годов. В последние годы исследование показывает растущую активность в развитии мезополосных источников.

В последней главе сделана попытка подчеркнуть физические пределы, которые ограничивают развитие современных технологий в создании более быстрых и сильных источников ПДЭМВ.

## **Список использованных источников**

1. Special Issue on high-power electromagnetic (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI) // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – August 2004. – Vol. 46, No. 3.
2. Thottappillil R. Response of electrified railway facilities to intentional electromagnetic interference: Review of research at Uppsala University / R. Thottappillil, D. Mansson, M. Backstrom // In Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008; APEMC 2008, Asia-Pacific Symposium on. – 2008. – P. 291–294.
3. Mansson D. Classifying facilities with respect to Intentional EMI / D. Mansson, M. Backstrom, R. Thottappillil // In Electromagnetic Compatibility, 2009. EMC 2009. IEEE International Symposium on. – 2009. – P. 249–254.
4. Mansson D. Intentional EMI against critical infrastructures, a discussion on mitigation philosophy / D. Mansson, M. Backstrom, R. Thottappillil // In Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on. – 2010. – P. 134–137.
5. Radasky W. The potential impacts of three High Power Electromagnetic (HPEM) threats on Smart Grids / W. Radasky // Electromagnetic Compatibility Magazine, IEEE. – 2012. – Vol. 1. – P. 107–110.
6. Baum C. A time-domain view of choice of transient excitation waveforms for enhanced response of electronic systems / C. Baum // Presented at the International Conference Electromagnetics Advanced Applications (ICEAA 2001). –Turin, Italy, September. – 2001. – P. 181-184.
7. Survey of worldwide highpower wideband capabilities / W. Prather, C. Baum, R. Torres, F. Sabath, D. Nitsch // Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. –2004. – Vol. 46. – P. 335–344.
8. Giri D. High-power electromagnetic radiators : nonlethal weapons and other applications / D. Giri // Cambridge, MA: Harvard University Press. – 2004.
9. Giri D. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME) / D. Giri, F. Tesche // Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. –2004. – Vol. 46. – P. 322–328.
10. IEC 61000-2-13: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2–13:Environment – Highpower electromagnetic (HPEM) environments - Radiated and conducted // Ed: IEC. – 2005.

11. Armanious M. Design and analysis of a high power moderate band radiator using a switched oscillator / M. Armanious // doctor of philosophy, college of optical sciences, the university of Arizona. – 2010.
12. Vega F. Analytical methods for the study and design of integrated switched oscillators and antennas for mesoband radiation / F. Vega // Docteur ès sciences, faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, école polytechnique fédérale de Lausanne. – 2013.
13. Switched oscillators and their integration into helical antennas / D. Giri, F. Tesche, M. Abdalla, M. Skipper, M. Nyffeler // Circuit and Electromagnetic System Design Notes. – 2009. – Vol. 58.
14. Switched oscillators and their integration into helical antennas / D.V. Giri, F. Tesche, M. Abdalla, M. Skipper, M. Nyffeler // Plasma Science, IEEE Transactions on. – 2010. – Vol. 38. – P. 1411–1426.
15. Giri D. Helical antennas energized by transient marx generators / D. Giri // In High Power Microwave Defense & Security Workshop. – Saint-Louis, France, 2011.
16. Sabath F. Risk potential of radiated HPEM environments / F. Sabath, H. Garbe // In Electromagnetic Compatibility, 2009. EMC 2009. IEEE International Symposium on. – 2009. – P. 226-231.
17. ITU. High-power electromagnetic immunity guide for telecommunication systems // In K. 81 ed. – 2009.
18. JOLT: a highly directive, very intensive, impulse-like radiator / C. Baum, W. Baker, W. Prather, J. Lehr, J.O. Loughlin, D. Giri, et al. // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92. – P. 1096–1109.
19. Tesche F. Swiss impulse radiating antenna (swira) characterization in the presence of a local ground plane (earth) /F. Tesche, D.V. Giri// Sensor and Simulation Notes. – 2011. – Vol. 557.
20. Conducted IEMI threats for commercial buildings / Y. Parfenov, L. Zdoukhov, W. Radasky, M. Ianoz // Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. –2004. – Vol. 46. – P. 404–411.
21. Mansson D. Propagation of uwb transients in lowvoltage power installation networks / D. Mansson, R. Thottappillil, M. Backstrom // Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. –2008. – Vol. 50. – P. 619-629.
22. Hagmann J. Application and propagation of transient pulses on power supply networks / J. Hagmann, S. Dickmann, S. Potthast // In EMC Europe 2011 York. – 2011. – P. 7–12.

23. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats / D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, J. Haseborg, H. Garbe // *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on.* – 2004. – Vol. 46. – P. 380–389.
24. IEC. 61000–4–33. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4–33: Testing and measurement techniques - Measurement methods for high-power transient parameters* // Ed: IEC, 2005.
25. A statistical analysis on the risetime of lightning current pulses in negative upward flashes measured at säntis tower / C. Romero, M. Paolone, F. Rachidi, M. Rubinstein, D. Pavanello, D. Giri // *In 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP).* – Vienna, Austria. – 2012.
26. Tesche F. Transformer responses to fast transient excitations / F. Tesche // *The Defense Procurement Agency of the Federal Department of Defense, Civil Protection and Sports.* – NEMP Laboratory 2002.
27. Performance limitations of transmission line oscillators for high powermesoband sources / J. Tyo, M. Skipper, M. Abdalla, S. Romero, D. Giri // *in Pulsed Power Conference, 2007 16th IEEE International.* – 2007. – P. 298–301.
28. Analysis of mesoband single element pulsed ring-down antennas for implementation in phased array systems / D. Belt, J. Mankowski, J. Walter, J. Dickens, M. Kristiansen // *In IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, Proceedings of the 2008.* – 2008. – P. 152–155.
29. Interaction between geometric parameters and output waveforms in high-power quarterwave oscillators / M. Armanious, J. Tyo, M. Skipper, M. Abdalla, W. Prather, J. Lawrance // *Plasma Science, IEEE Transactions on.* –2010. – Vol. 38. – P. 1124–1131.
30. Giri D. HPEM 201-2009: Damped sinusoid basics / D. Giri // Ed. Chateau d'Oex. – Switzerland. – 2009.
31. Backstrom M. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience / M. Backstrom K. Lovstrand // *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on.* –2004. – Vol. 46. – P. 396–403.
32. Vulnerability of european rail traffic management system to radiated intentional EMI / D. Mansson, R. Thottappillil, M. Backstrom, O. Lunden // *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on.* –2008. – Vol. 50. –P. 101–109.
33. IEC 61000–4–35: *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4–35: Testing and measurement techniques - HPEM simulator compendium* // Ed: IEC. – 2009.
34. Das A. *Digital communication principles and system modeling* / A. Das // Berlin: Springer Berlin. – 2013.

35. Baum C. Norms and Eigenvector norms / C. Baum // *Mathematics Notes*. – 1979. – Vol. 63.
36. Giri D. Personal Communication / D. Giri, N. Mora // Ed. – 2012.
37. Giri D. Classification of Intentional EMI based on bandwidth / D. Giri // Presented at the AMEREM 2002, Annapolis. – 2002.
38. Trends in EM susceptibility of IT equipment / R. Hoad, N. Carter, D. Herke, S. Watkins // *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*. – 2004. – Vol. 46. – P. 390–395.
39. High power microwave effects on civilian equipment / O. Arnesen, E. Krogager, M. Backstrom, S. Bo-Sande, J. Godo, S. Harkonen, et al. // Presented at the URSI General Assembly. – New Delhi. – 2005.
40. Giri D. Documented Electromagnetic Effects (EME) / D. Giri // In EUROEM 2008. – Lausanne, Switzerland. – 2008.
41. Brauer F. Susceptibility of IT network systems to interferences by HPEM / F. Brauer, F. Sabath, J. Haseborg // In *Electromagnetic Compatibility, 2009. EMC 2009. IEEE International Symposium on*. – 2009. – P. 237–242.
42. Investigation of hardening measures for IT equipment against radiated and conducted IEMI / F. Brauer, S. Fahlbusch, J. Haseborg, S. Potthast // *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*. – 2012. – Vol. 54. – P. 1055–1065.
43. IEC. 61000–1–5. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1–5: General – High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems Reference // Ed: IEC. – 2004.
44. Sabath F. Effects of documented HPEM attacks on systems. Course HPE 201–2011: High Power Electromagnetics Course – Effects / F. Sabath // Ed. Schloss Noer. – Germany. – 2011.
45. UWB HPM at ISL: The GIMLI project and other applications / P. Delmote, J. Duperoux, F. Bieth, S. Pinguet // In *High Power Microwave Defense & Security Workshop*. – SaintLouis, France. – 2011.
46. Design, fabrication, and testing of a paraboloidal reflector antenna and pulser system for impulse-like waveforms *Plasma Science* / D. Giri, H. Lackner, I. Smith, D. Morton, C. Baum, J. Marek, et al. // *IEEE Transactions on*. – 1997. – Vol. 25. – P. 318–326.
47. Benford J. High power microwaves / J. Benford, E. Schamiloglu, J.A. Swegle // Taylor & Francis. – New York – 2007.
48. Highpower sources of ultrawideband radiation with subnanosecond pulse length / A.M. Efremov, V.I. Koshelev, B.M. Kovalchuk, V.V. Plisko, K.N. Sukchushin // presented at the 14th International Symposium on High Current Electronics. – Tomsk, Russia – 2006.



49. Vega F. Design of a high power ultra wideband system using a fast impulse current generator / F. Vega // Doctor of Philosophy, Electrical and Electronics Engineering Department. – National University of Colombia – 2011.
50. Hua Y. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise / Y. Hua, T.K. Sarkar // Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on. – 1990. – Vol. 38. – P. 814-824.
51. Chauveau J. Selection of Contributing Natural Poles for the Characterization of Perfectly Conducting Targets in Resonance Region / J. Chauveau, N. de Beaucoudrey, and J. Saillard // Antennas and Propagation, IEEE Transactions on. – 2007. – Vol. 55. – P. 2610-2617.
52. Rubinstein A. Simulation of electrically large structures in EMC studies - application to automotive EMC / A. Rubinstein // Swiss Federal Institute of Technology EPFL. – 2004.
53. Nasser E. Fundamental of gaseous ionization and plasma electronics / E. Nasser // Wiley Interscience. – 1971.
54. Schaefer G. . Gas discharge closing switches / G. Schaefer, M. Kristiansen, A.H. Guenther //. N.Y: Plenum Press. – New York, 1991.
55. Martin J.C. Nanosecond pulse techniques / J.C. Martin // Proceedings of the IEEE. – 1992 – Vol. 80. – P. 934-945.
56. On pulsed power / J.C. Martin, T.H. Martin, A.H. Guenther, M. Kristiansen, J.C. Martin // Plenum Press. – New York, 1996.
57. The breakdown fields and risetimes of select gases under conditions of fast charging (~20 ns and less) and high pressures (20-100 atmospheres) / V. Carboni, H. Lackner, D. V. Giri, J.M. Lehr // Switching Notes. – 2002. – Vol. 32.
58. Barker R.J. High-power microwave sources and technologies / R.J. Barker, E. Schamiloglu // NY: IEEE Press. – New York, 2001.
59. Pai S.T. Introduction to high power pulse technology / S.T. Pai and Q. Zhang // World Scientific. – Singapore, 1995.
60. Fundamental Physical considerations for ultrafast spark gap switching / J.M. Lehr, C.E. Baum, W.D. Prather, F.J. // Agee Switching Notes. – 1997. – Vol. 28.
61. Electrostatic field management and electrodynamic modeling of switched quarter-wave oscillators / M. Armanious, J.S. Tyo, M.C. Skipper, M.D. Abdalla, W.D. Prather, G. Gruen // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on. – 2011. – Vol. 18, P. 1054- 1065.
62. HPEM Case Brochure // DIEHL. – 2011.
63. Taylor C.D. High-power microwave systems and effects / C.D. Taylor, D.V. Giri // Taylor and Francis. – Washington, July 18, 1994. – 215 p.