



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.6>

УДК: 621.396.669

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ, СОЗДАВАЕМЫХ В ЭЛЕКТРОННОМ УСТРОЙСТВЕ ИСТОЧНИКОМ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

Е.А. Макарецкий

**Тульский государственный университет
300012 Россия, г. Тула, пр. Ленина 92**

Статья поступила в редакцию 26 марта 2025 г.

Аннотация. Предложена модель оценки уровня помеховых сигналов, наводимых на элементах коммутационной схемы электронного устройства внешним источником электромагнитных волн СВЧ диапазона. Выделены типовые геометрические конфигурации элементов коммутационной схемы, выполняющие функции приемных элементов. Определены возможные уровни сигналов помех при различных расстояниях от источника помех. Оценены частотный диапазон и мощность сигналов помех, которые могут привести к нарушению функционирования электронных устройств.

Ключевые слова: электромагнитные помехи, электронные устройства, СВЧ излучение.

Финансирование: Работы проводились при поддержке Гранта в форме субсидии на проведение научных исследований Комитета по науке и инноватике Тульской области №15 от 21 июня 2024 г.

Автор для переписки: Макарецкий Евгений Александрович, makaretsky@mail.ru

Введение

В последние годы резко повысился интерес к проблемам помехозащищенности радиоэлектронных средств (РЭС) [1-3], причем одновременно рассматриваются две противоположные задачи: обеспечения помехозащищенности радиоустройств [1-4] и создания помех, нарушающих работоспособность РЭС [5,6]. В основе решения обеих задач лежит необходимость оценки уровня помех, наводимых источником электромагнитных волн (передатчиком с антенной) на приемное устройство, содержащее антенну, приемник и схему обработки данных. Основное внимание при этом уделяется рассмотрению прохождения сигнала помехи через основной канал проникновения – приемную антенну [6], поскольку приемная часть РЭС в этом случае наиболее уязвима из-за высокой чувствительности.

Однако по мере развития и совершенствования электронной техники снижаются уровни рабочих напряжений и мощностей, выделяемых на нагрузках схемных элементов. Одновременно уменьшаются уровни энергии внешнего воздействия, способные вызвать нарушения в работе этой техники.

За период с 1950-го до середины 80-х годов уровень энергии, необходимой для нарушения работы РЭА, обусловленного выходом из строя элементной базы этой аппаратуры, снизился с 10^{-2} до 10^{-9} Дж [5]. Широкое распространение получила цифровая техника, весьма чувствительная к возмущениям импульсного характера. Таким образом, платой за колоссально возросшие возможности РЭА явилось возрастание уязвимости ее элементов и прежде всего тех, которые имеют высокую степень интеграции, от мощного электромагнитного излучения, индуцирующего большие токи в электрических цепях РЭА [5].

На практике существует большое количество радиоустройств (в первую очередь – малогабаритные коптеры), для которых целесообразно рассмотреть воздействие помех на цепи синхронизации, цифровой обработки сигналов и электропитания. Проникновение помех в эти каналы может нарушить работоспособность электронных схем и привести к нарушению работоспособности даже при отсутствии работающего канала радиоприема. Во многом это связано

с существенным снижением уровней сигналов в каналах цифровой обработки, что повышает их чувствительность к помехам.

Внешним источником помех может являться мощный СВЧ генератор с антенной системой, формирующий импульсные сигналы помех.

При использовании импульсного режима работы высокочастотные сигналы помехи могут детектироваться на входных полупроводниковых элементах интегральных схем (ИС), преобразуясь в видеоимпульсы, нарушающие нормальную работу интегральных схем. При непрерывном режиме работы передатчика помех в результате детектирования формируется постоянный уровень, изменяющий напряжение на входе интегральной схемы, который может привести к изменению уровня логических сигналов на входе. Для нарушения нормальной работы цифровых ИС с уровнями TTL достаточно 0,3...0,4 В, для ИС с напряжениями питания 3,3 В для нарушения нормального функционирования достаточно 0,2...0,3 В [7].

Целью данной работы является оценка уровня наводимых помех в электронных устройствах при облучении их электромагнитными волнами.

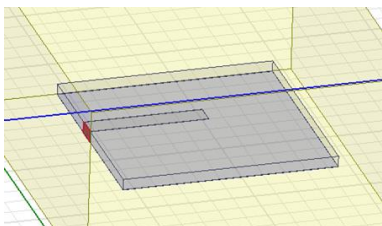
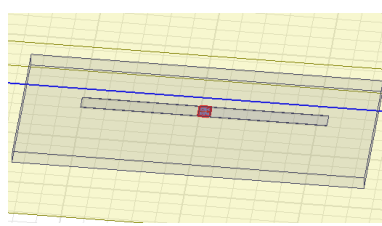
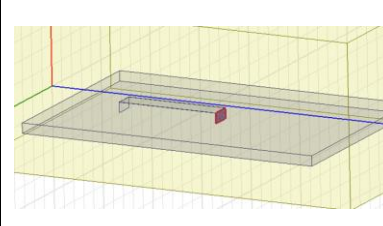
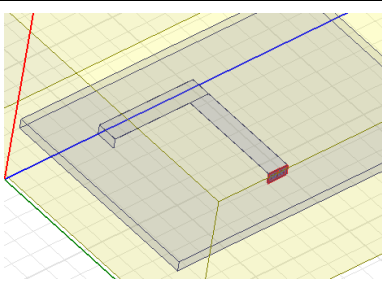
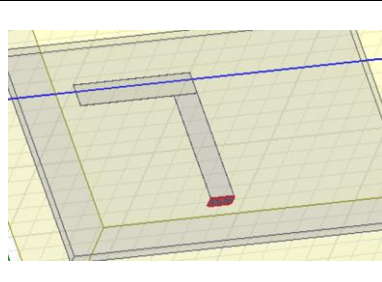
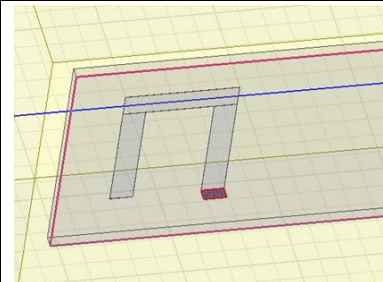
1. Модель оценки уровня помех.

При воздействии СВЧ излучения на электронное устройство эффективность наведения помехи будет определяться соотношением размеров элементарной антенны (элемента геометрии проводников платы) с длиной волны излучения. Учитывая небольшие размеры электронных блоков коптеров (полетный контроллер обычно имеет размеры 20×20 или 30×30 мм, плата соединений 50×50 мм) участки коммутационной схемы платы, которые могут выполнять роль антенн, имеют размеры на уровне единиц миллиметров. Их можно рассматривать в качестве простейших вибраторов, принимающих сигналы помех.

В работе были рассмотрены следующие геометрические конфигурации (Таблица 1): отрезок полосковой линии передачи длиной 5 мм с волновым сопротивлением 50 Ом на диэлектрической подложке (плате) с металлизацией

нижней поверхности; отрезок проводника – симметричный вибратор длиной 10 мм на диэлектрической подложке без металлизации; отрезок полосковой линии длиной 5 мм с коротким замыканием на конце; Г-образный полосковый проводник с коротким замыканием на конце; разомкнутый Г-образный полосковый проводник; П-образный разомкнутый полосковый проводник.

Таблица 1. Геометрические конфигурации элементов коммутационной схемы, выполняющие роль приемной антенны.

		
1. Отрезок проводника	2. Симметричный вибратор	3. Короткозамкнутый отрезок
		
4. Г-образный короткозамкнутый проводник	5. Г-образный разомкнутый проводник	6. П-образный проводник

Формирование помехи производится передатчиком, представляющим собой источник электромагнитных волн с комплексом известных (задаваемых) параметров: мощность, коэффициент усиления антенны; длина волны излучения; предполагается, что диаграмма направленности антенны ориентирована максимумом на цель.

Модель приемника представляет собой приемную антенну в виде геометрической конфигурации проводника, расположенного на диэлектрической подложке. Выходной сигнал – напряжение, формируемое на выходе (порте) приемной антенны.

Коэффициент усиления и коэффициент стоячей волны (КСВ) приемной антенны рассчитываются в программе ANSYS HFSS для различных частот,

предполагается, что для тракта передачи – приема выполняются приближения дальней зоны; что максимум диаграммы направленности приемного элемента совпадает с направлением на источник сигнала (максимальное усиление приемной антенны); при распространении электромагнитных волн учитываются поляризационные потери.

Расчет плотности мощности передатчика (модуля вектора Пойнтинга) $|\Pi|$ на входе антенны приемника производится по соотношению [8]:

$$|\Pi| = \frac{P_{nep} G_{nep}}{4\pi R^2}, \quad (1)$$

где P_{nep} – мощность передатчика; G_{nep} – коэффициент усиления антенны передатчика; R – расстояние передающая антенна – приемная антенна;

Расчет амплитуды напряжения сигнала на выходе приемной антенны U_c производится по соотношениям [8]:

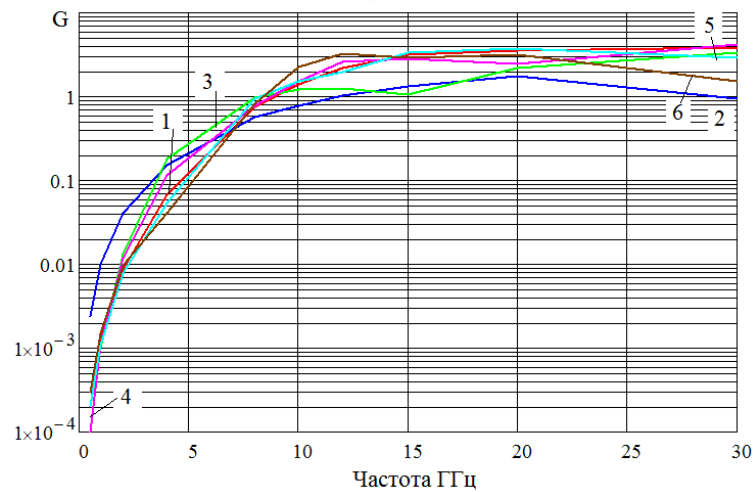
$$P_c = \frac{P_{nep} G_{nep} G_{np} \lambda^2 |\xi|^2}{(4\pi)^2} \frac{4KCB}{R^2 (1 + KCB)^2};$$

$$U_c = \sqrt{P_c Z_\theta}, \quad (2)$$

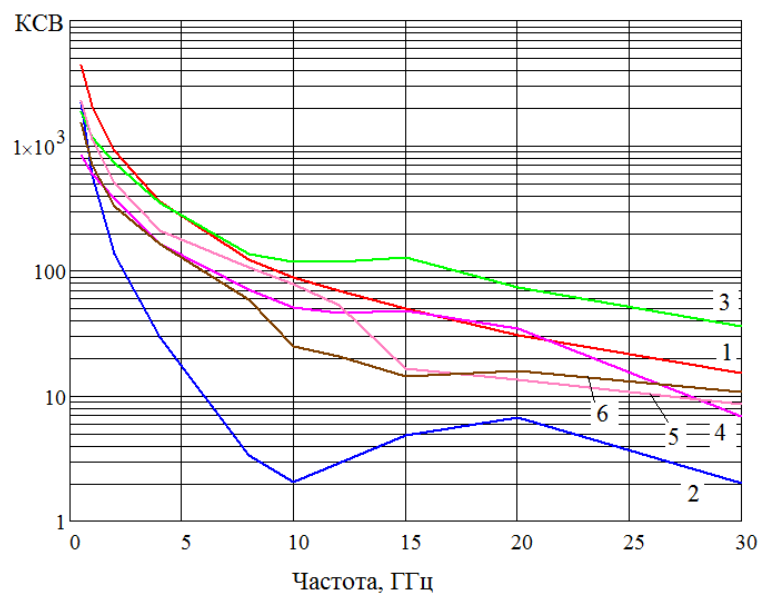
$$U_c = \frac{\lambda |\xi|}{2\pi R (1 + KCB)} \sqrt{Z_\theta P_{nep} G_{nep} G_{np} KCB}, \quad (3)$$

где P_c – мощность принимаемого сигнала; G_{np} – усиление приемной антенны; λ – длина волны излучения; KCB – коэффициент стоячей волны выход антенны – порт; волновое сопротивление порта $Z_\theta = 50$ Ом; $|\xi|^2$ – коэффициент, учитывающий несовпадение поляризаций антенн передатчика и приемника; U_c – напряжение на выходе приемного элемента.

На рисунке 1 представлены графики зависимостей коэффициента усиления приемной антенны G и KCB от частоты (номер графика соответствует номеру геометрической конфигурации в таблице 1), построенные по результатам расчета в программе ANSYS HFSS.



а



б

Рис. 1. Графики зависимостей усиления (а) и КСВ (б) приемных элементов от частоты.

Расчетные данные показывают большой диапазон изменения усиления и КСВ приемного элемента в диапазоне частот. Так, коэффициент усиления приемной антенны изменяется от 10^{-4} на низких частотах (500 МГц) до 2...3 в высокочастотной области (30 ГГц). КСВ изменяется более чем в тысячу раз. Для приемного элемента в виде симметричного вибратора имеют место минимальные значения КСВ в области частот 8...12 ГГц, в которой вибратор становится полуволновым.

В то же время, коэффициент усиления приемного элемента слабо зависит от типа элемента (рисунок 1а), а КСВ для различных типов элементов может

отличаться в 10...50 раз, что приведет к существенно различным уровням наводимых сигналов.

2. Результаты расчета уровня помех в электронном устройстве

На основе описанной модели формирования помехи в электронном устройстве были рассчитаны амплитуды гармонической помехи, наводимой в коммутационной схеме электронного устройства в диапазоне частот 0,5...30 ГГц при различной мощности передатчика и расстояниях до электронного устройства.

Диапазон изменения мощности передатчика составил 100 Вт...10 кВт, усиления передающей антенны $G_{\text{пер}} = 10...1000$. Усиление передающей антенны $G_{\text{пер}} = 6$ может иметь место при круговой диаграмме направленности в азимутальной плоскости и ширине диаграммы направленности по углу места порядка 6 градусов; усиление передающей антенны $G_{\text{пер}} = 100$ может иметь место для однолучевой диаграммы направленности при ширине ДН порядка 20 градусов в двух плоскостях; усиление передающей антенны $G_{\text{пер}} = 1000$ может соответствовать однолучевой симметричной ДН шириной порядка 5...6 градусов. Первый вариант антенны позволяет вести обзор пространства без сканирования, второй и третий – обязательно со сканированием.

В расчетах значение $|\xi|^2$ (коэффициента, учитывающего несовпадение поляризаций антенн передатчика и приемника) принималось равным 0,5 (имеет место при сочетании поляризаций приемника и передатчика круговая поляризация – линейная поляризация), волновое сопротивление линии $Z_{\text{с}} = 50$ Ом.

Результаты расчетов приведены на рисунках 2-5.

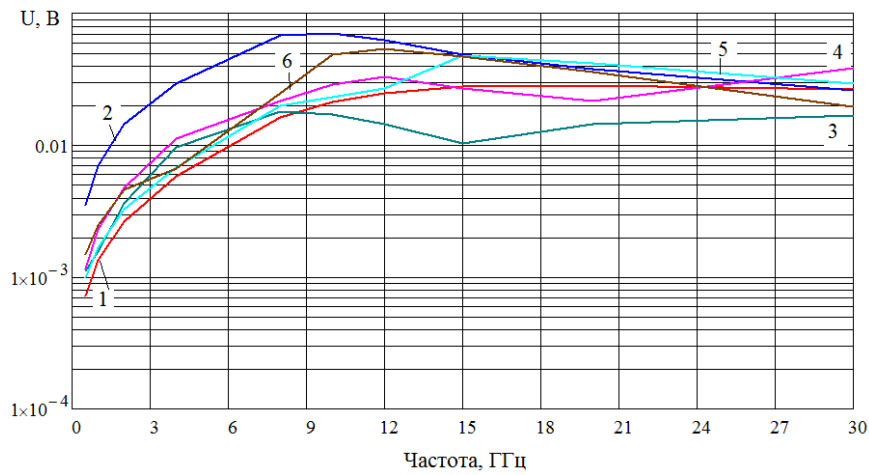


Рис. 2. Графики зависимости напряжения помехи от частоты для различных приемных элементов (мощность передатчика $P_{\text{пер}} = 1000$ Вт, усиление передающей антенны $G_{\text{пер}} = 1000$, расстояние 100 м).

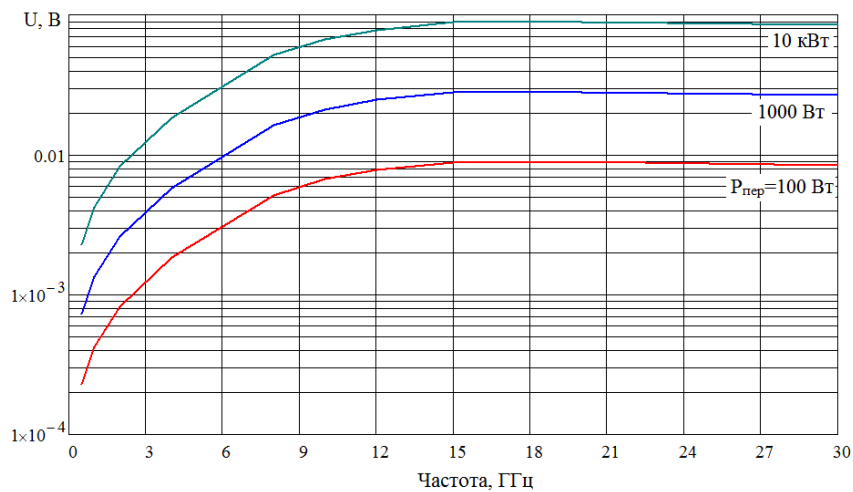


Рис. 3. Графики зависимости напряжения помехи от частоты для первого приемного элемента ($G_{\text{пер}} = 1000$, $R = 100$ м) при различной мощности передатчика.

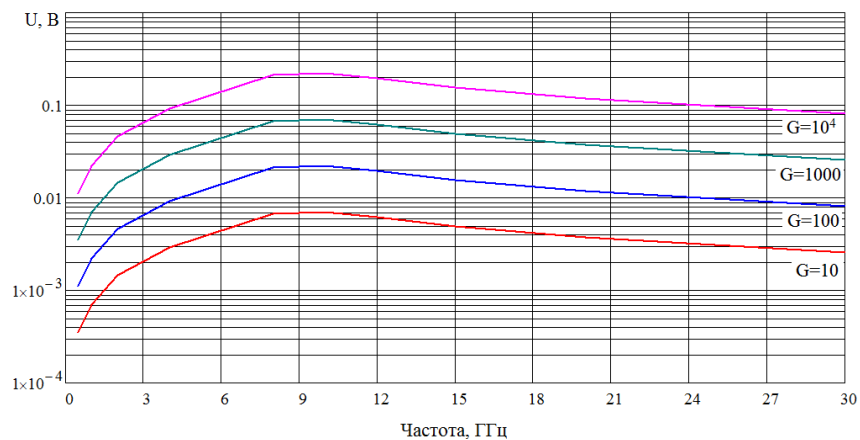


Рис. 4. Графики зависимости напряжения помехи от частоты для второго приемного элемента ($R = 100$ м, $P_{\text{пер}} = 1000$ Вт) при различном усилении передающей антенны.

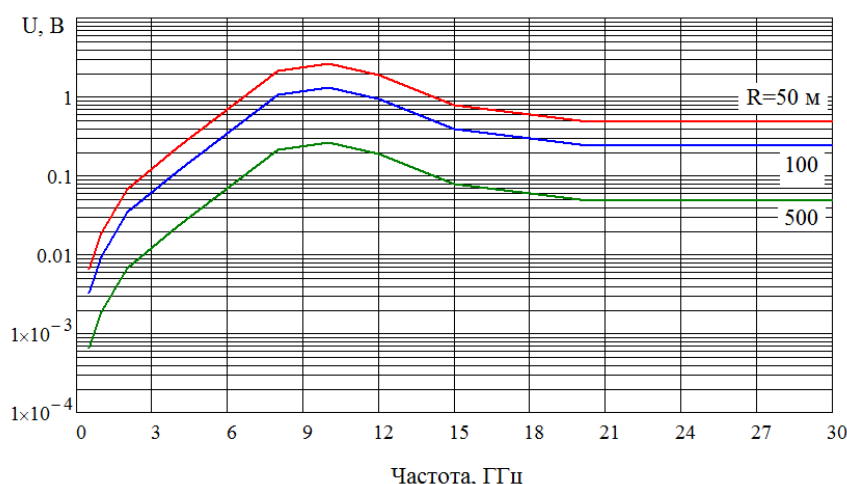


Рис. 5. Графики зависимости напряжения помехи от частоты для шестого приемного элемента ($P_{\text{пер}} = 10$ кВт; $G_{\text{пер}} = 1000$).

3. Обсуждение результатов оценки напряжения помехи

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- наибольшая амплитуда наводимой помехи имеет место для частот 10...15 ГГц, на которых длина приемного элемента (5...10 мм) является резонансной (близка к значению четверти длины волны несимметричного вибратора или половине длины волны симметричного вибратора); в реальной конструкции длины шлейфов существенно различаются и для наведения помехи необходимо использовать мощный источник излучения, обеспечивающий высокую спектральную плотность электромагнитных волн в широком диапазоне частот;
- амплитуда наводимой помехи на приемном элементе невелика и при реальных параметрах системы подавления ($P_{\text{пер}} \leq 1000$ Вт, $G_{\text{пер}} \leq 10$) она составляет на расстояниях 100 м десятки милливольт;
- для обеспечения наведения уровней сигнала помехи (несколько десятых вольта), обеспечивающих нарушение функционирования электронных устройств (без их разрушения) на расстояниях порядка ста метров необходимо использование мощного широкополосного источника излучения (с импульсной мощностью не менее 10 кВт в диапазоне частот 6...15 ГГц) и антенны с большим усилением (более 1000);
- полученные характеристики воздействия электромагнитного поля на приемный элемент являются верхней (лучшей) границей воздействия, поскольку любые

конструктивные элементы реального устройства выполняют функции отражения, поглощения и рассеивания электромагнитной энергии и уровень наводимого сигнала будет ниже;

- при использовании генератора помех с импульсной мощностью 10 кВт, длительностью импульса 10 нс и периодом повторения 10 мкс (скважность 1000), средняя мощность генератора составит 10 Вт, что вполне реализуемо на практике, однако создание антенны с коэффициентом усиления $G_{\text{пер}} = 1000$ требует эффективной поверхности не менее 0,3...0,4 квадратных метра и поперечные размеры антенны должны быть не менее 0,6...0,7 м;

- энергия импульса при принятых выше параметрах генератора СВЧ (импульсная мощность 10 кВт, длительность импульса 10 нс) равна 10^{-4} Дж, что приблизительно соответствует уровню функционального поражения смесительных и детекторных диодов СВЧ [5] радиотехнического тракта.

Заключение

Проведенное исследование уровня помеховых сигналов, наводимых на элементах коммутационной схемы электронного устройства внешним источником электромагнитных волн, позволило определить возможные уровни сигналов на различных расстояниях и оценить требования к частотному диапазону и мощности систем для формирования сигналов помех, достаточных для нарушения функционирования электронного устройства.

Финансирование: Работы проводились при поддержке Гранта в форме субсидии на проведение научных исследований Комитета по науке и инноватике Тульской области №15 от 21 июня 2024 г.

Литература

1. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. –СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Под ред. В.И. Борисова; – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
3. Парамонов А.А., Хоанг В.З. Способ повышения помехоустойчивости радиолинии связи в условиях деструктивного воздействия преднамеренных помех. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.11>.
4. Генев А.А., Слепых А.А., Сухов А.В., Филатов В.И. Оценка воздействий случайных и преднамеренных помех на систему передачи данных с когнитивным псевдослучайным переключение рабочих частот. // Журнал радиоэлектроники. 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.7>
5. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем/ Под ред. А.И. Куприянова. М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.
6. Перунов, Ю. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю. М. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.
7. В. Белоус, С. Дрозд, А. Листопадов. Схемотехнические методы повышения помехоустойчивости цифровых КМОП-микросхем/ Компоненты и технологии. № 6, 2010. С. 132-137.
8. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.

Для цитирования:

Макарецкий Е.А. Оценка уровня электромагнитных помех, создаваемых в электронном устройстве источником СВЧ излучения. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.6>.