

УДК 621.396/.397.001.4:006.354

Мясоедова Лариса Анатольевна
Амурский государственный университет
г. Благовещенск, Россия
e-mail: lo.myasoedova@gmail.com
Myasoedova Larisa Anatolievna
Amur State University
Blagoveshchensk, Russia
e-mail: lo.myasoedova@gmail.com

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE POWER ELECTRICAL NETWORK AND ELECTRONIC DEVICES

Аннотация. Рассмотрены механизмы возникновения электромагнитных помех в электрической сети и пути их проникновения в электронные устройства. Учитывая стохастический характер электромагнитных помех, предложено моделировать их случайными процессами. Приведены выражения, описывающие корреляционные функции, характерные для наиболее распространенных в электрической сети видов электромагнитных помех, а также пример применения предложенного подхода оценки электромагнитной совместимости электронных устройств и силовой сети.

Abstract. The mechanisms of the occurrence of electromagnetic interference in the electrical network and the ways of their penetration into electronic devices are considered. Given the stochastic nature of electromagnetic interference, it is proposed to model them by random processes. The expressions describing the correlation functions characteristic of the most common types of electromagnetic interference in the electrical network are given. An example of the application of the proposed approach for assessing the electromagnetic compatibility of electronic devices and the power supply network is given.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электрическая сеть, электронные устройства, оборудование, функциональная безопасность, электромагнитные помехи, помехоустойчивость.

Key words: electromagnetic compatibility, electrical network, electronic devices, equipment, functional safety, electromagnetic interference, noise immunity.

DOI: 10.22250/20730268_2023_103_42

Введение

Использование автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на объектах электроэнергетики, современных систем технологического и диспетчерского управления электроэнергетическими системами, средств электронно-вычислительной техники и электронной аппаратуры с микромодульными, электронными и микроэлектронными схемами, устройств релейной защиты на микроэлектронной и микропроцессорной элементных базах – все это обусловило ужесточение требований к входным и выходным характеристикам источников вторичного электропитания указанных устройств. В то же время в электрических сетях наблюдается постоянный рост электромагнитных помех, в том числе вызванных искажением качества электроэнергии, усиливается

проблема электромагнитной совместимости [1 – 14]. В результате наблюдается снижение соотношения сигнал/помеха, в основном обуславливающего чувствительность таких устройств к электромагнитным помехам.

Под входными и выходными характеристиками источников питания электронных и микропроцессорных устройств понимаются количественные характеристики напряжения, отражающие качество электрической энергии (КЭ). Наиболее критичными к КЭ являются интегральные микросхемы и полупроводниковые элементы, на долю которых приходится соответственно 45% и 38% общего числа отказов. По статистическим данным, типовой вычислительный комплекс дает до 128 сбоев в месяц, половина из которых происходит из-за ухудшения качества электроэнергии на выходе источников вторичного электропитания.

Проблема возникла в связи с тем, что указанные средства и силовая сеть имеют единый источник питания. Электромагнитные помехи (ЭМП) из силовой сети являются внешними для автоматизированных систем управления, электронных средств. Они могут воздействовать либо на приемную антенну системы, искажая приемный сигнал, либо непосредственно на компоненты системы, вызывая в них нежелательные изменения параметров или неалгоритмические переходы логических элементов. Импульсные помехи из силовой сети, возникающие вследствие выбросов или провалов питающего напряжения, могут проникать через цифровое устройство, паразитные емкости силовых трансформаторов, распределенные емкости между сетью питания и шинами вторичного напряжения. Они попадают на входы логических элементов, вызывая сбои и ошибки в работе [3,15 - 16]. Поэтому для решения задач функциональной надежности электронных средств или автоматизированных систем управления необходимо уметь правильно оценивать характеристики провалов и выбросов питающего напряжения, а по ним – влияние на работу АСУ и электронных устройств.

Постановка задачи

Чтобы обеспечить электромагнитную совместимость на объекте электроэнергетической системы, сначала необходимо выяснить причины и источники появления ЭМП, определить, как происходит возникновение и распространение ЭМП во вторичных цепях, выбрать способ моделирования ЭМП и рассмотреть их взаимодействие с электронными устройствами, микропроцессорными средствами, АСУ. Все перечисленные средства и устройства для дальнейшего анализа назовем электронными устройствами, или smart-устройствами.

Механизмы проникновения электромагнитных помех в электронное устройство

Рассмотрим способы появления и распространения электромагнитных помех во вторичных цепях электронных устройств. Структурная схема появления и распространения помех показана на рис. 1 [17]. Наибольшую угрозу представляет воздействие помех на вторичные цепи электронных устройств, распространяющееся по распределительному устройству подстанции или электрической станции, проникая в цепи измерительных трансформаторов тока и напряжения (рис. 1).

Проникновение помех может осуществляться по кондуктивному или индуктивному механизму. В первом случае это результат повышения потенциала части заземляющего устройства в районе электроустановок, к которым подходят вторичные кабели электронного устройства, – например, микропроцессорной релейной защиты. Так, повышение потенциала происходит при коротких замыканиях или разрядах молнии вследствие протекания через заземляющее устройство значительных токов.

Индуктивный механизм влияния на кабели означает наведение помех во вторичных кабелях внешним электромагнитным полем. Такие поля обычно создаются при коммутационных операциях или грозовых разрядах. При этом роль заземления также высока: при некачественном заземляющем устройстве значительная зона повышенного потенциала на поверхности земли играет роль обкладки конденсатора, наводящей высокочастотный потенциал во вторичном кабеле электронного устройства, выступающем в роли второй обкладки.

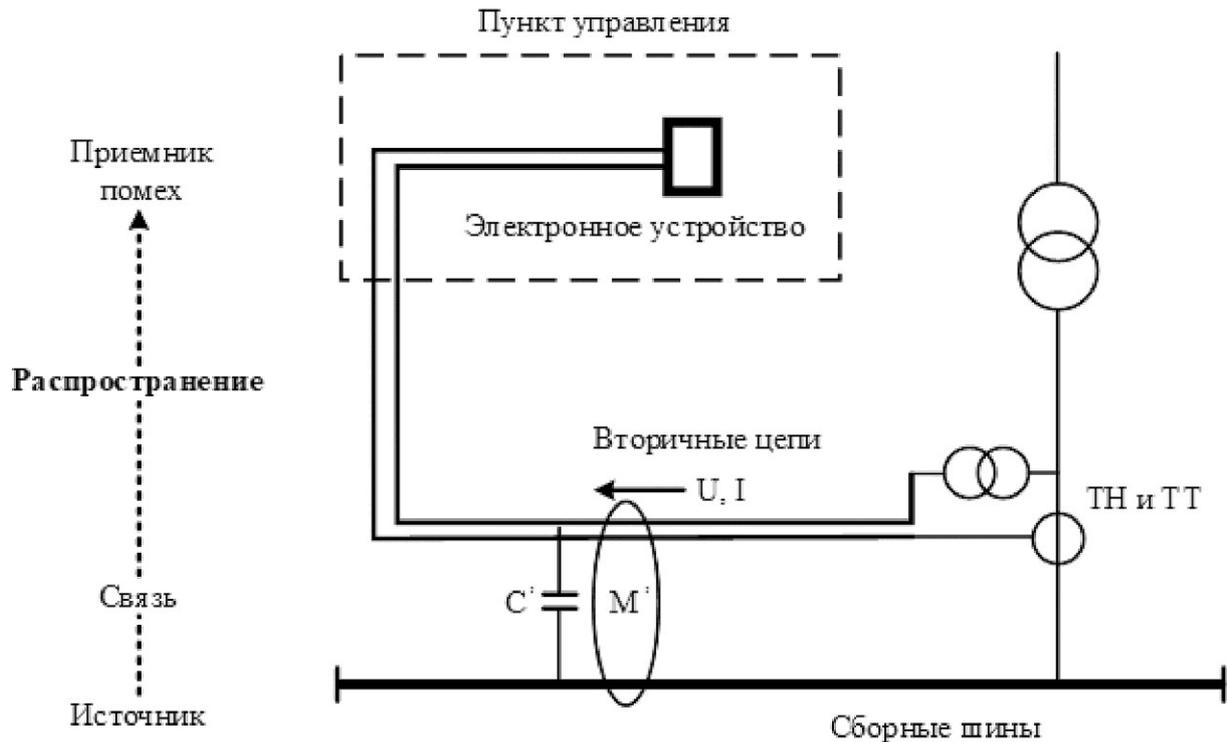


Рис. 1. Способы возникновения и распространения электромагнитных помех во вторичных цепях.

В любом случае созданное в кабеле напряжение помехи оказывается приложенным к входам аппаратуры электронных устройств. Особенно опасны наводки в высокочастотных кабелях, применяемых для организации высокочастотных каналов по воздушным линиям: затухание помехи в таком кабеле обычно мало, а используемая в большинстве случаев несимметричная схема передачи сигнала (когда экран кабеля выступает в качестве второго провода сигнальной цепи) повышает восприимчивость к помехам.

В некоторых случаях имеется угроза воздействия полей непосредственно на аппаратуру электронного устройства и ее коммуникации, расположенные внутри здания. И, наконец, все помехи в цепях оперативного тока также оказывают влияние на аппаратуру электронного устройства, если для нее не предусмотрена изолированная система питания.

При этом ЭМП, излучаемые различными источниками, воздействуют на электронное устройство, линии сигналов, системы питания и заземляющее устройство и отдельно и комбинированно друг с другом, при случайном наложении во времени.

Моделирование взаимодействия электромагнитных помех и электронного устройства

Взаимодействие ЭМП и электронных устройств целесообразно рассматривать по их влиянию на надежность электронного устройства.

Исходя из рассмотренного механизма возникновения и проникновения электромагнитных помех, видно, что предсказать форму и интенсивность внешних электромагнитных помех невозможно, так как они имеют стохастический характер. Следовательно, их нужно моделировать случайным процессом и описывать вероятностными характеристиками. При исследовании выбросов и провалов напряжения требуется определить аналитически их характеристики: суммарную длительность, среднюю частоту и среднюю длительность одного выброса (провала), оценить их влияние на надежность электронных средств. Исходя из поставленных задач, должны рассматриваться два подхода: расчет

характеристик выбросов (провалов) питающего напряжения при нормальном законе распределения и корреляционной функции, и при произвольных законах распределения и корреляционных функциях.

Для их реализации сначала традиционными методами теории вероятностей и математической статистики [например, 18, 19] определяется вид закона распределения и корреляционная функция.

Первый подход применяется после определения закона распределения и вида корреляционной функции, что относится в основном к исследованию электромагнитных помех, источником которых является низкое качество электроэнергии. Здесь максимальное значение уровня питающего напряжения U_c определяется правилом “ 3σ ”, поскольку закон распределения вероятностей ординат случайного процесса соответствующих показателей качества электроэнергии близок к нормальному.

Под выбросом (провалом) напряжения понимается случайный процесс, ординаты которого превышают (не достигают) фиксированного расчетного уровня напряжения U_c . При этом возможны три случая:

- 1 – надежная работа электронных устройств;
- 2 – появление сбоев в их работе;
- 3 – отказ в работе электронных средств.

Рассмотрим их.

1. Случай 1. Надежная работа электронных устройств:

$$|M_{U_{B(n)}} + 3\sigma_{U_{B(n)}}| \leq U_{\text{доп1}},$$

где $M_{U_{B(n)}}$, $\sigma_{U_{B(n)}}$ – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайного процесса выбросов (провалов) питающего напряжения; $U_{\text{доп1}}$ – допустимое значение выброса (провала) питающего напряжения, при котором сохраняется надежная работа электронных устройств; его можно рассматривать как запас помехоустойчивости, обеспечивающий в соответствии с [20] функциональную безопасность.

2. Случай 2. Появление сбоев в работе электронных устройств:

$$U_{\text{доп1}} < |M_{U_{B(n)}} + 3\sigma_{U_{B(n)}}| \leq U_{\text{доп2}},$$

где $U_{\text{доп2}}$ – допустимое значение выброса (провала) питающего напряжения, превышение которого ведет к отказу в работе электронных устройств, элементов или каналов связи, ЭВМ, т.е. пороговый уровень, определяющий безотказную работу.

В этом случае определяется число провалов (выбросов) за допустимый уровень $U_{\text{доп2}}$ в течение исследуемого времени по формуле:

$$\bar{n}_1 = \frac{T\sigma_{(U)_{B(n)}}}{2\pi\sigma_{U_{B(n)}}} e^{-\frac{(U_{\text{доп2}} - M_{U_{B(n)}})^2}{2\sigma_{U_{B(n)}}^2}}, \quad (1)$$

где T – исследуемый интервал времени; $\sigma_{(U)_{B(n)}}$ – величина, означающая, что корреляционная функция случайного процесса выбросов (провалов) питающего напряжения должна быть дифференцируема.

Чтобы стационарная случайная функция была дифференцируема, достаточно существование второй частной производной от корреляционной функции $K_{UB(n)}(\tau)$ при нулевом значении ее аргумента, т.е.:

$$\sigma_{(U)_{B(n)}}^2 = -\left. \frac{d^2 K_{UB(n)}(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0}. \quad (2)$$

Если выбросы (провалы) за допустимый уровень $U_{\text{доп2}}$ имеются, то происходит отказ в работе электронных устройств.

Если же выбросов (провалов) за уровень $U_{\text{доп2}}$ нет, то определяется среднее число выбросов

(провалов) напряжения в течение рассматриваемого интервала времени за допустимый уровень $U_{\text{доп1}}$:

$$\bar{n}_2 = \frac{T\sigma_{\langle U \rangle_{\text{В(п)}}}}{\sigma_{U_{\text{В(п)}}}} e^{-\frac{(U_{\text{доп1}} - M_{U_{\text{В(п)}}})^2}{2\sigma_{U_{\text{В(п)}}}^2}} \quad (3)$$

и средняя длительность выброса (провала) в секундах или градусах:

$$\bar{\tau} = \pi \frac{\sigma_{U_{\text{В(п)}}}}{\sigma_{\langle U \rangle_{\text{В(п)}}}} e^{-\frac{(U_{\text{доп1}} - M_{U_{\text{В(п)}}})^2}{2\sigma_{U_{\text{В(п)}}}^2}} \left[1 - \Phi \left(\frac{U_{\text{доп1}} - M_{U_{\text{В(п)}}}}{\sigma_{U_{\text{В(п)}}}} \right) \right], \quad (4)$$

где $\Phi \left(\frac{U_{\text{доп1}} - M_{U_{\text{В(п)}}}}{\sigma_{U_{\text{В(п)}}}} \right)$ – функция Лапласа, которая сравнивается с допустимой длительностью выброса.

Далее согласно требованиям, предъявляемым к функциональной надежности электронных устройств, а также к качеству питающего напряжения в течение 95% рассматриваемого интервала времени, значения выбросов (провалов) не должны выходить за пределы допустимого значения выбросов $U_{\text{доп1}}$.

Исходя из этого, определяется вероятность выхода за его пределы:

$$p = \frac{\bar{n}_2 \bar{\tau}}{T}, \quad (5)$$

которая не должна превышать 5%. В противном случае в работе электронных устройств и вычислительной техники будут наблюдаться ошибки или сбои, которые сразу трудно выявить.

Находится средняя частота выбросов (провалов) питающего напряжения за рассматриваемый период времени:

$$\nu_{\text{В(п)}} = \frac{\bar{n}_2}{T}. \quad (6)$$

3. Случай 3. Отказ в работе электронных устройств:

$$|M_{U_{\text{В(п)}}} + 3\sigma_{U_{\text{В(п)}}}| \leq U_{\text{доп2}}.$$

Наблюдается повреждение электронных устройств.

Для практического использования предлагаемой методики оценки выбросов (провалов) питающего напряжения необходима аппроксимация корреляционных функций случайного процесса выбросов (провалов) питающего напряжения дифференцируемыми выражениями. Как показали многочисленные исследования, проведенные в различных энергосистемах России, а также на ряде промышленных предприятий, корреляционные функции напряжения источника питания электронных устройств с вероятностью 0,9 - 0,95 аппроксимируются выражениями вида:

$$\begin{aligned} K_{U_{\text{В(п)}}}(\tau) &= \sigma_{U_{\text{В(п)}}}^2 e^{-\alpha^2 \tau^2}; \\ K_{U_{\text{В(п)}}}(\tau) &= \sigma_{U_{\text{В(п)}}}^2 e^{-\alpha^2 \tau^2} \cos^2 \beta |\tau|; \\ K_{U_{\text{В(п)}}}(\tau) &= \sigma_{U_{\text{В(п)}}}^2 e^{-\alpha |\tau|} \left(\cos \beta |\tau| + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta |\tau| \right); \\ K_{U_{\text{В(п)}}}(\tau) &= e^{-\alpha |\tau|} (1 + \alpha |\tau|), \end{aligned}$$

которые имеют непрерывные производные в точке $\tau=0$.

Здесь α – постоянная аппроксимации корреляционной функции, определяемая в результате статистической обработки; β – собственная частота спектра, устанавливаемая по графику спектральной плотности.

При произвольном законе распределения подход к моделированию механизма взаимодействия ЭМП и электронного устройства тот же, разница лишь в кратности среднего квадратического отклонения.

Пример применения модели взаимодействия ЭМП и электронного устройства

В качестве примера рассмотрено совместное подключение к шинам понизительной подстанции напряжением 110/10 кВ силовой нагрузки, батарей конденсаторов и трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (ТП), питающей управляющую ЭВМ АСУ. По результатам экспериментальных исследований посадок напряжения при отключении батареи конденсаторов на шинах ТП получены следующие значения числовых характеристик и корреляционная функция:

$$M_{U_{B(П)}} = 8\%; \sigma_{U_{B(П)}} = 2,2\%;$$

$$K_{U_{B(П)}}(\tau) = \sigma^2 e^{-1,1|\tau|} (\cos 0,7|\tau| + 1,6 \sin 0,7|\tau|).$$

Ошибки и сбои в работе управляющей ЭВМ АСУ ТП наступают, если $U_{доп1} \geq 20\%$, а отказ – если $U_{доп2} \geq 20\%$.

Необходимо определить надежность работы управляющей ЭВМ в таких условиях.

В данном примере рассмотрен второй случай. Поэтому вначале определяется

$$\sigma_{\langle U \rangle_{П}}^2 = - \frac{d^2 K_{U_{П}}(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0} = \sigma_{U_{П}}^2 (\alpha^2 + \beta^2).$$

Тогда среднее число провалов, превышающее 20%, рассчитывается по выражению (1) и равно 0, т.е. выхода за уровень 20% нет и ЭВМ будет работать.

Среднее число провалов напряжения, превышающих 10%, находится по выражению (3): $n_2=86,25$.

Длительность провала определяется по выражению (4) и равна $\tau=1,35$ с.

Затем находится вероятность выхода провала напряжения за допустимый предел 10% по выражению (5): $p=0,19$, что больше 0,05 – следовательно, в работе управляющей ЭВМ будут сбои и ошибки, а полученные результаты счета или управляющее воздействие будут некорректными.

Частота провалов, определенная по выражению (6), равна $\nu_{п}=0,14$ с⁻¹.

Заключение

Проведенный анализ показал, что все возможные способы возникновения ЭМП и их проникновения в электронные устройства реализуются двумя механизмами – кондуктивным и индуктивным.

Предложен способ моделирования взаимодействия ЭМП и электронных устройств, заключающийся в оценке уровней выбросов и провалов питающего напряжения при совместном подключении к узлу сети силовой нагрузки и электронных устройств. Сравнивая полученные уровни выбросов (провалов) с допустимыми уровнями питающего напряжения, производят оценку надежности функционирования электронного устройства

Показано, что при электромагнитных помехах в силовой сети в работе электронных устройств наблюдаются сбои и ошибки или наступает их отказ.

1. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: пер. с нем. / под ред. Б.К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.: ил.

2. Bernd, Jaekel. Considerations on immunity test levels and methods with regard to functional safety. In LEWANDOWSKI G. and JANISZEWSKI J.M. (ed.). // Electromagnetic Compatibility 2006. Wroclaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, 2006. – P.187-192, ISBN 837085-947-X.

3. Седельников, Ю.Е. [и др.]. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учеб. пособ. для вузов / под ред. Ю.Е. Седельникова. – М.: Юрайт, 2021. – 318 с. – ISBN 978-5-534-13826-9 // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/466935> (дата обращения: 11.04.2022).

4. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. / И.В. Жежеленко [и др.] – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.

5. Овсянников, А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник / А. Г. Овсянников, Р.

К. Борисов. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – 196 с. – ISBN 978-5-7782-3367-6 // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/118157> (дата обращения: 11.04.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

6. Кузнецов, В.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособ. – Тольятти: ТГУ, 2014. – 69 с. – ISBN 978-5-8259-0830-4 // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/140216> (дата обращения: 11.04.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

7. Дьяков, А.Ф. [и др.]. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.: ил.

8. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.

9. Кармашев, В.С. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. – М.: Научно-производственный центр «НОРТ», 2001. – 401 с.

10. Салтыков, В.М. [и др.] Электромагнитная совместимость в электроэнергетике (источники электромагнитных полей и их влияние): учеб. пособ. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007. – 170 с.

11. Салтыков, В.М., Безменова, Н.В. Электромагнитные поля промышленной частоты в электрических сетях и распределительных установках: моногр. – М.: Машиностроение, 2011. – 206 с.

12. Трофимов, Г.Г., Розман, О.М. Оценка качества электроэнергии с использованием теории нечетких множеств // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1991. – №1. – С. 69-77.

13. Paul, C. Transmission Lines in Digital Systems for EMC practitioners. – Wiley-IEEE Press., 2012. – 270 p.

14. Weston, D.A. Electromagnetic compatibility: methods, analysis, circuits, and measurement. Third edition. – USA, Boca Raton: CRC Press, 2016. – 1184 p. ISBN-10: 148229950X. ISBN-13: 978-1482299502.

15. Гизатулин, Р.М., Гизатулин, З.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания: моногр. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.

16. Геворкян, В.М. Электромагнитная совместимость электронных информационных систем: в 2 ч. – Ч. 1. Общие вопросы электромагнитной совместимости технических средств: учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 432 с.

17. Кравченко, В.И. [и др.]. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.

18. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособ. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

19. Семенов, В. А. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособ. Стандарт третьего поколения. – СПб.: Питер, 2013. – 192 с.

20. СТ ИЕС/TS 61000-1-2-2015. Межгосударственный стандарт. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 1-2. Общие положения. Методология достижения функциональной безопасности электрических и электронных систем, включая оборудование, в отношении электромагнитных помех – РТС-тендер. Официальное издание. – М.: Стандартиформ, 2020. – 70 с.