

УДК: 656.256.3(075.8)

ОСНОВЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМ ПРЕДНАМЕРЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Комнатный Д.В.**

к.т.н, доцент, Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
E-mail: toe4031@gstu.by, Гомель, Республика Беларусь

Аннотация

В статье рассматривается научно-техническая проблема обеспечения устойчивости современных микропроцессорных многоуровневых систем интервального регулирования движения поездов к электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия (ЭИПВ). В статье рассмотрено проникновение таких импульсов через паразитные антенны – неоднородности корпусов аппаратуры систем интервального регулирования. Описаны модели преднамеренных электромагнитных воздействий. Проанализирована возможность использования для моделирования ЭИПВ импульсов с линейно-частотной модуляцией и атомарных функций. Предлагается использовать усовершенствованный аналитический метод расчета дифракции через отверстия, основанный на применении вектора Герца.

Ключевые слова:

транспорт, системы интервального регулирования, электромагнитные импульсы преднамеренного воздействия, паразитные антенны, модели сверхширокополосных импульсных помех, аналитический метод расчета дифракции, вектор Герца.

FUNDAMENTALS OF STABILITY ANALYSIS OF MODERN INTERVAL CONTROL SYSTEMS TO ELECTROMAGNETIC PULSES OF DELIBERATE IMPACT

Komnatny D.V. PhD, Associate Professor, Belarusian State University of Transport (BelSUT),
E-mail: toe4031@gstu.by, Gomel, Belarus Republic

Annotation

The scientific-technical problem of modern microprocessor multilevel interval control of train movement systems immunity securing for electromagnetic pulses of intentional impact is considered. Penetration of these pulses through parasitic antennas – discontinuities of such systems apparatus cabinets is considered. The models of intentional electromagnetic impacts are described. The opportunity of electromagnetic pulses modeling by linear-frequency modulated impulses and by monatomic functions is analyzed. The improved analytical method for diffraction calculation, based on Hertz vector usage, is proposed for usage.

Keywords:

transport, interval control of train movement systems, electromagnetic pulses of intentional impact, parasitic antennas, ultrahigh bandwidth electromagnetic impulses models, analytical method of diffraction calculation, Hertz vector.

Введение

Для современных перспективных систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП) имеются те же тенденции в проблеме электромагнитной совместимости, что и для телекоммуникационных систем.

Так, в настоящее время при разработке СИРДП используется большое количество коммерчески доступной микропроцессорной аппаратуры, элементная база которой чувствительна к электромагнитным помехам. Также СИРДП строятся на базе известных сетевых технологий. Увеличение мощности применяемых передатчиков информации, расширение применяемого спектра частот ухудшает электромагнитную обстановку (ЭМО) в местах эксплуатации СИРДП также, как и для телекоммуникационных систем. На железных дорогах дополнительной причиной ухудшения ЭМО является увеличение интенсивности движения поездов, внедрение нового тягового подвижного состава [1, 2].

Наблюдается растущая концентрация аппаратуры СИРДП в зданиях управления станциями, отделениями дорог и железными дорогами в целом. В децентрализованных системах микропроцессорной автоблокировки аппаратура размещалась в шкафах сигнальных точек на перегонах. Аппаратура микропроцессорной централизованной автоблокировки в значительной степени размещается на промежуточных станциях [3]. В перспективных СИРДП, первые образцы которых внедряются в Российской Федерации (в частности система управления высокоскоростной железнодорожной магистралью Москва – Санкт-Петербург), имеется многоуровневое расположение оборудования [4, 5, 6]. В этих СИРДП реализуются высокоточные координатные технологии, которые предполагают концентрацию управления в центрах управления движением.

Передача информации на борт поезда осуществляется по радиоканалам систем DHR, TETRA, GSM-R. Система имеет существенные информационные и коммуникационные функции: управленческая поддержка, информационное обеспечение, коммуникационное обеспечение [5]. Поэтому перспективные СИРДП обладают сложной топологией и большим количеством микропроцессорного коммутационного оборудования, и это сближает их с телекоммуникационными системами [1, 4].

Описанные особенности развития современных СИРДП повышают возможность осуществления электромагнитных атак на центры управления движением поездов с помощью электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия (ЭИПВ), так как при увеличении концентрации оборудования и усложнении топологии системы воздействие ЭИПВ может повлиять на условия безопасности движения поездов.

Следовательно, возникает новая для специалистов по железнодорожной автоматике и телемеханике проблема – обеспечение устойчивости СИРДП к ЭИПВ. Новизна этой проблемы подтверждается тем, что в публикациях по электро-

магнитной совместимости на железнодорожном транспорте [7 – 9] эта проблема не поставлена. Вместе с тем ограниченно опубликованы результаты работы консорциума SECRET, созданного в Евросоюзе для исследования возможных воздействий ЭИПВ на системы управления движением поездов, разработки способов выявления электромагнитных атак и защиты от них [10].

Анализ этих материалов показывает, что внимание исследователей консорциума было сконцентрировано на помехах в каналах передачи данных. Эти преднамеренно созданные помехи воздействуют на бализы, антенны GPS, петлевые антенны индуктивной связи с поездами, радары поездов, и эти помехи подавляют полезный сигнал. В консорциуме разработаны методы защиты от подавления полезного сигнала и предложена система мониторинга ЭМО с целью выявления внешних электромагнитных воздействий. Можно заметить, что при этом рассматривались только воздействия на штатные антенны оборудования СИРДП.

Таким образом, из трех путей воздействия ЭИПВ на системы ЖАТ, указанных в [4], а именно: повреждение электронной элементной базы, создание помех приему/передаче сигналов, искажение обрабатываемой информации, в консорциуме изучены только второй и, частично, третий пути.

Воздействие ЭИПВ, направленное на отказы и сбои элементной базы, в открытых источниках консорциума не отражено. Поэтому целью настоящей статьи является обсуждение способов анализа и, в дальнейшем, прогнозирования устойчивости СИРДП к таким воздействиям. Актуальность этой проблемы для Союзного государства Республики Беларусь и Российской Федерации со всей очевидностью следует из сложного политического положения вокруг Союзного государства и в глобальном масштабе.

Методология и результаты исследования

Проблема устойчивости современных и перспективных СИРДП к ЭИПВ имеет в своем составе три соподчиненных задачи: выявление каналов проникновения помех, выбор моделей импульсов преднамеренного воздействия, выбор и обоснование методов расчетного анализа воздействия ЭИПВ на микропроцессорную аппаратуру СИРДП.

ЭИПВ могут воздействовать,

- во-первых, на штатные антенны аппаратуры СИРДП, а также на антенны систем мониторинга ЭМО. При этом происходят отказы входных цепей указанных технических средств.

- во-вторых, ЭИПВ могут проникать внутрь корпусов аппаратуры СИРДП через паразитные антенны, которыми являются отверстия и щели корпуса [11]. Такой сценарий реализуется при электромагнитной атаке на помещения, в которых размещены аппаратура интервального регулирования и передачи информации. Поэтому, число каналов проникновения ЭИПВ значительно больше, чем каналов воздействия на штатные антенны СИРДП с целью подавления полезного

сигнала.

Для анализа воздействия ЭИПВ, особенно на паразитные антенны, необходимо использовать модели импульсов с непрерывным спектром в широкой полосе частот. Тогда проникновение помех через такие антенны анализируется более точно, с учетом неизвестных и непредусмотренных частотно-избирательных свойств антенны. В этом состоит отличие ЭИПВ от излучений, подавляющих полезный сигнал. В материалах консорциума SECRET в качестве моделей подавляющих излучений выбраны сигналы с дискретным спектром [12]: монохроматический синусоидальный, амплитудно-модулированный, частотно-модулированный. При этом рассматривались только два импульсных сигнала: в виде биэкспоненты а также в виде затухающей синусоиды [10].

На основании стандарта МЭК-61000-2-13, а также монографии [13] для анализа воздействия ЭИПВ, кроме биэкспоненциального импульса и импульса в виде затухающей синусоиды, могут быть предложены гауссов импульс, радиоимпульс с прямоугольной огибающей, косинусный и косинускубический импульсы. При этом следует учитывать, что гауссов импульс наиболее часто используется при анализе работы радиотехнических и радиолокационных систем. Следовательно, этот импульс может использоваться при исследовании устойчивости СИРДП к воздействию мощных радиотехнических систем, при работе последних в штатном режиме или при использовании как источника ЭИПВ [14]. На практике такой случай воздействия встречается сравнительно редко, поэтому модель в виде гауссова импульса имеет меньшее значение по сравнению с другими импульсами, перечисленными выше.

Спектры импульсов, используемых в качестве моделей ЭИПВ, являются неравномерными с ярко выраженными максимумами. Многие импульсы имеют в спектре частоты, на которых спектральная плотность равняется нулю [15]. С другой стороны, в технике радиоэлектронной борьбы находят применение импульсы с линейно-частотной внутриимпульсной модуляцией [11, 12] вида:

$$u(t) = A \cos\left(\omega_0 t + \frac{\gamma t^2}{2}\right), |t| \leq \frac{\tau_{\text{ИМП}}}{2}, \omega \in \left[\omega_0 - \frac{\gamma \tau_{\text{ИМП}}}{2}; \omega_0 + \frac{\gamma \tau_{\text{ИМП}}}{2}\right], \quad (1)$$

где ω_0 — круговая частота импульса, рад/с; γ — параметр модуляции, рад/с²; $\tau_{\text{ИМП}}$ — длительность импульса, с; ω — круговая частота спектра, рад/с.

Импульсы с линейно-частотной модуляцией (1) обладают равномерной спектральной функцией

$$|S(\omega)| = A \sqrt{\frac{\pi}{2\gamma}} \text{ при } \frac{\gamma \tau_{\text{ИМП}}^2}{2\pi} > 100.$$

Также известны импульсы вида [16]

$$u(t) = \frac{S_0 \omega_B \sin \omega_B (t - t_0)}{\pi \omega_B (t - t_0)}, \quad (2)$$

где $S_0 = \frac{A\pi}{\omega_B}$, A — амплитуда импульса, В;

ω_B — верхняя круговая частота спектра, рад/с; t — время, с; t_0 — временной параметр импульса,

с. У импульса (2) спектральная плотность $S(\omega) = S_0$;

В спектрах импульсов (1) и (2) отсутствуют частоты с минимумами концентрации энергии, следовательно, на всех частотах в паразитную антенну поступает одинаковая энергия. Это позволяет выявить чувствительность аппаратуры СИРДП к преднамеренным помехам на каждой частоте без исключения.

Но ЭИПВ на базе импульсов вида (1) и (2) должны иметь значительную полную энергию. Особенно это затруднение видно для импульса

$$(2), \text{ так как для него } S(\omega) = S_0 \sim \frac{1}{\omega_B}.$$

Поэтому рассмотренные импульсы (1) и (2) имеют преимущества перед традиционными [15] по распределению энергии в спектре, но полностью проигрывают им по полной величине энергии импульса, необходимой для того, чтобы импульс представлял реальную опасность. Преднамеренное генерирование таких импульсов требует весьма мощных специальных генераторов большой сложности и высокой стоимости.

Для моделирования импульсных электромагнитных полей в последнее время предложены атомарные функции, которые являются бесконечно дифференцируемыми функциями, отличными от нуля в ограниченных областях [13]. Например, экспоненциально затухающая атомарная функция $\text{sep}(t)$ имеет вид:

$$\text{sep}(t) = \frac{2A}{\alpha_2} e^{-C_0 \left(\frac{t - \tau_{\text{ИМП}}}{\alpha_2} \right)} h_{\alpha_2} \left(\frac{2 \frac{t}{\tau_{\text{ИМП}}} - 1}{\alpha_2 - 1} \right), C_0 = \frac{\alpha_2 \ln 2}{\tau_{\text{ИМП}} (\alpha_1 - 1)}$$

$$h_{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{2} \text{ при } \left(2 \frac{t}{\tau_{\text{ИМП}}} \right) \leq \frac{\alpha_2 - 1}{\alpha_2 (\alpha_2 - 1)}, \quad (3)$$

где α_1, α_2 — параметры функции.

Спектральная функция $\text{Sep}(\omega)$ атомарной функции (3) выражается суммой двух быстроходящихся бесконечных рядов, причем каждый член ряда содержит бесконечное произведение функций вида [13]:

$$f_{n,k} = \frac{\sin \left[\left(\tau_{\text{имп}} - \frac{\tau_{\text{имп}}}{\alpha_2} \right) \left(\frac{\tau_{\text{имп}}}{\alpha_2} \right)^{n-1} \frac{\pi k}{\tau_{\text{имп}}^n} \right]}{\left(\tau_{\text{имп}} - \frac{\tau_{\text{имп}}}{\alpha_2} \right) \left(\frac{\tau_{\text{имп}}}{\alpha_2} \right)^{n-1} \frac{\pi k}{\tau_{\text{имп}}^n}}, \quad (4)$$

Использование такой спектральной функции при анализе устойчивости СИРДП к импульсным помехам вызывает значительные затруднения. Поэтому, в настоящее время, использование атомарных функций не имеет очевидных преимуществ перед традиционным представлением импульсных помех.

Таким образом, импульсы с непрерывным спектром остаются основными моделями ЭИПВ, применение которых оправдано для анализа воздействия на микроэлектронную аппаратуру современных многоуровневых СИРДП.

Расчет воздействия ЭИПВ на штатные антенны не представляет значительных трудностей, так как электродинамические свойства этих антенн хорошо изучены. С другой стороны, паразитные антенны в составе сложного аппаратного комплекса СИРДП достаточно многочисленны, а их электродинамические характеристики формируются случайно в зависимости от особенностей конструкции корпуса. Паразитные антенны являются переизлучающими. Принятая электромагнитная энергия излучается внутрь корпуса технического средства СИРДП и воздействует на входные контуры электронных узлов, имеющие свои многочисленные резонансные частоты.

Следовательно, при прогнозировании воздействия ЭИПВ на аппаратуру СИРДП через паразитные антенны необходимо описание процесса возбуждения паразитных антенн корпусов электромагнитными импульсами и распространения помехового электромагнитного поля внутри корпуса.

Получить такое описание позволяют, в частности, интегральные уравнения теории дифракции, решение которых удобно получать численно [17].

Аналитические методы также могут найти применение для решения рассматриваемой задачи. Преимуществами аналитических методов является сравнительно простой математический аппарат, вычислительная эффективность, несложная реализация, отсутствие вычислительных трудностей. Применение аналитических методов оправдано там, где требуется высокая скорость вычислений и быстрое получение результата, не в ущерб адекватности моделирования [18]. Представляется, что такая ситуация возникает при проектировании многоуровневых СИРДП с большим количеством рассредоточенной аппаратуры.

Среди аналитических методов известна группа методов приближенного решения задач дифракции, основанных на принципе Гюйгенса-Кирхгофа и методе Кирхгофа. Однако, эти методы имеют те или иные ограничения, приближения и недостатки [17, 19]. В [19] обоснован подход к

решению задач дифракции, основанный на методе Кирхгофа, не имеющий значительных ограничений при его использовании на практике. Основной идеей метода [19] является применение для решения дифракционных задач вектора Герца. Исходными данными для расчета является распределение плоской линейно-поляризованной волны на апертуре, не возмущенное краями апертуры. Принимается, что апертура расположена на плоской бесконечной проводящей поверхности. Распределение поля может быть задано как в плоскости падения излучения (она же плоскость с апертурой), так и перпендикулярно этой плоскости. В этой работе приведены результаты решения дифракционных задач для бесконечной узкой щели, прямоугольного и круглого отверстий. Результаты представлены в виде замкнутых выражений для электрической составляющей электромагнитного поля, излучаемого апертурой в область за плоскостью. Все это позволяет использовать метод вектора Герца из [19] для решения задач анализа воздействия ЭИПВ на аппаратуру СИРДП через паразитные антенны в виде неоднородностей корпусов этой аппаратуры.

Если известны характеристики помехового электромагнитного поля, излучаемого неоднородностью корпуса в его внутреннюю область, то наведенные во входных цепях узлов микроэлектронной аппаратуры СИРДП помехи можно рассчитать с помощью известных соотношений для антенн, образованных линиями связи в узлах [20].

Заключение

Изложенные в статье соображения позволяют сделать вывод, что полученные в рамках работы консорциума SECRET (судя по информации из открытых источников [4, 10]) результаты по исследованию воздействия ЭИПВ на аппаратуру современных многоуровневых СИРДП не охватывают всех аспектов проблемы преднамеренных электромагнитных воздействий на указанные технические средства. Следует рассматривать воздействие мощных ЭИПВ, направленное на создание отказов и сбоев микроэлектронной аппаратуры СИРДП.

Необходимо учитывать воздействие ЭИПВ не только на штатные антенны оборудования передачи информации, но и на паразитные антенны корпусов аппаратуры СИРДП, а также на резонансные контуры во входных цепях указанной аппаратуры. Эти антенны являются важнейшим каналом проникновения электромагнитных помех. Следует использовать модели ЭИПВ с непрерывным спектром в широкой полосе частот, главным образом, биэкспоненциальный импульс, импульс в виде затухающей синусоиды, косинусный и косинускубические импульсы, прямоугольный радиоимпульс.

Среди разработанных к настоящему времени методов вычислительной электродинамики имеются апробированные численные и аналитические методы, позволяющие анализировать про-

никновение помеховых электромагнитных полей ЭИПВ в корпуса технических средств СИРДП через паразитные антенны.

Обобщая результаты рассмотрения всех выделенных в статье задач, можно заключить, что проблема анализа устойчивости современных и перспективных цифровых многоуровневых СИРДП к ЭИПВ может быть решена путем расчета переизлучения паразитной антенной ЭИПВ, моделируемых импульсами с непрерывным спектром. Инженерный расчет осуществляется усовершенствованным

аналитическим методом Кирхгофа. Это позволит прогнозировать и предотвращать отказы и сбои микропроцессорных многоуровневых СИРДП, вызванные повреждениями элементной базы с помощью ЭИПВ, поскольку исключение этого пути воздействия ЭИПВ также имеет большое значение для безопасности функционирования СИРДП.

Представленные в работе результаты публикуются впервые.

Список литературы

1. Соколов, С. А. Воздействие внешних электромагнитных полей на оптические кабели связи и гибридные линии / С. А. Соколов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2018. – 214 с.
2. Кечиев, Л. Н. Электромагнитная несовместимость: опасности, катастрофы, риски. / Л. Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2022. – 344 с.
3. Системы управления движением поездов на перегонах: учебник для вузов ж-д. трансп. в 3х частях / В. М. Лисенков [и др.], под ред. В. М. Лисенкова. – М. : Учебно-метод. центр по образованию на ж-д. трансп., 2009. – Ч. 1 : Функциональные схемы систем. – 159 с.
4. Комплексная технология интервального регулирования движение поездов / С. А. Кобзев [и др.], под ред С. А. Кобзева и Е. Н. Розенберга. – М. : Акц. о-во 8Т Издательские технологии, 2022. – 288 с.
5. Розенберг, Е. Н. Развитие сигнализации на железной дороге / Е. Н. Розенберг, В. Я. Цветков // Наука и технологии железных дорог – 2024. – № 2(30). – С. 17 – 22.
6. Хромушин, К. Д. Инновационные решения для ВСЖМ / К. Д. Хромушин [и др.] // Автоматика, связь, информатика – 2024. – № 5. – С. 12–14.
7. Ognusola, A. Electromagnetic Compatibility in Railways / A. Ognusola, A. Mariscotti. – Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. – 544 p.
8. Bucker, D. G. Electromagnetic compatibility: analysis and case studies in transportation / D. G. Bucker. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. – 400 p.
9. Macdiguran, M. Electrostatic discharge: Understand, Simulate and Fix ESD Problems / M. Macdiguram. – 3rd ed. – N. Y.: Wiley-IEEE Press, 2009. – 312 p.
10. Filippini, C. White paper Secret / C. Filippini. – Paris, VIC-ETF, 2015. – 32 p.
11. Радиоэлектронная борьба. Силовое подавление радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин [и др.], под ред. А. И. Куприянова. – М. : Вузовская книга, 2007. – 468 с.
12. Иванов, М. Б. Радиотехнические цепи и сигналы / М. Б. Иванов, А. Б. Сергиенко, В. Н. Ушаков. – СПб. : Питер, 2014. – 226 с.
13. Ерофеенко, В. Т. Задачи экранирования электромагнитных полей экранами из композитных материалов / В. Т. Ерофеенко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2023. – 271 с.
14. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы / П. А. Бакулев. М. : Радиотехника, 2015. – 440 с.
15. Хохлов, Н. С. Типовые модели деструктивных широкополосных и сверхширокополосных сигналов, воздействующих на системы связи специального назначения / Н. С. Хохлов, С. В. Канавин, И. В. Гилев // Вестник Воронежского института МВД России – 2019. – № 1. – С. 91–101.
16. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Высшая школа, 2003. – 462 с.
17. Ваганов, Р. Б. Основы теории дифракции / Р. Б. Ваганов, Б. З. Кацеленбаум. – М. : Наука, 1982. – 272 с.
18. Газизов, Т. Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / Т. Р. Газизов. – Томск : Изд-во НТЛ, 2003. – 167 с.
19. Назьев, В. Г. Дипольно-волновая теория дифракции электромагнитного излучения / В. Г. Назьев // Успехи физических наук – 2022. – Том 172, № 5. – С. 601– 607.
20. Кравченко, В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.