

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

УДК 656.25 (078.5)

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕКОНДУКТИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА КОРПУСА-ЭКРАНЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЦЕНТРАЛИЗАЦИЙ

Рассмотрены структуры микропроцессорных централизаций и проанализированы некондуктивные электромагнитные помехи, которые могут воздействовать на распределенное оборудование централизаций во многих точках. Показано, что в современных условиях необходимо учитывать поражение централизации электромагнитными импульсами преднамеренного воздействия. Исследовано проникновение импульсных некондуктивных помех через апертуры в корпусах-экранах микропроцессорных технических средств. Получены формулы для расчета напряженности электромагнитного поля и напряжения, формируемых в апертуре при внешнем облучении. Обоснована возможность моделирования параметров этого поля путем непосредственного воздействия генератором-имитатором помех на апертуру.

Современный этап развития сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах характеризуется широким внедрением микропроцессорных централизаций стрелок и сигналов малых, средних и крупных станций.

Микропроцессорная централизация (МПЦ) представляет собой сложный программно-аппаратный комплекс, который может иметь различную структуру. Кроме централизованной, при разработке МПЦ целесообразно использовать распределенные структуры: радиальную, магистральную, сетевую. Распределенными структурами обладают многие зарубежные МПЦ известных производителей: Ebilock-950, SimisW, ESTW L90, Alister. В МПЦ централизованной структуры также имеется значительное число напольных микропроцессорных контроллеров нижнего уровня, например, в МПЦ МЗ-Ф [1, 2]. Наличие большого числа микропроцессорных технических средств, распределенных на значительной площади путевого парка железнодорожной станции, приводит к тому, что аппаратура МПЦ становится подверженной действию некондуктивных электромагнитных помех во многих точках.

По материалам работ [3, 4], на МПЦ могут воздействовать виды некондуктивных электромагнитных помех, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Виды некондуктивных электромагнитных помех

Название	Частотный диапазон
Излучение от разрядов молнии	$100 \cdot 10^3 - 10 \cdot 10^6$ Гц
Мощные радиопередатчики	$10 - 10 \cdot 10^9$ Гц
Аварийные режимы линий электропередач и контактной сети	$0.1 \cdot 10^3 - 150 \cdot 10^3$ Гц
Высоковольтные установки	$3 - 4 \cdot 10^6$
Электромагнитные импульсы преднамеренного воздействия	До $10 \cdot 10^9$ Гц

Перечисленные в таблице 1 некондуктивные электромагнитные помехи имеют различную распространенность и неодинаковую опасность для микропроцессорной техники централизации. Наиболее вероятно воздействие излучения молниевых разрядов и аварийных режимов линий электропередач и контактной сети.

Наличие мощных радиоизлучателей со значительными боковыми лепестками излучения вблизи железнодорожных станций маловероятно. Высоковольтные и высокочастотные установки, как правило, не располагаются вблизи железнодорожных станций и должны отвечать нормам помехоэмиссии. На сортировочных станциях к таким установкам относятся электромагнитные вагонные замедлители сортировочных горок, но в настоящее время такие замедлители не получили широкого распространения. Наличие промышленных источников некондуктивных помех можно выявить путем измерений и устранить помехи на стороне источника.

С другой стороны, современное положение в мире заставляет предполагать возможность поражения МПЦ электромагнитными импульсами преднамеренного воздействия (ЭИПВ). При атаке генераторы таких импульсов можно разместить в пределах прямой видимости объекта. На основании [5, 6], для излучения ЭИПВ будут применяться направленные антенны: рупорные, линзовые и зеркальные. Первые генерируют сферическую слаборазрушенную волну, остальные – плоскую высоконаправленную электромагнитную волну. Во временной области сферическая волна описывается следующей формулой [7]

$$E(r, t) = \frac{E_m}{R} f\left(t - \frac{R}{c}\right) e^{-\gamma R}, \quad (1)$$

где E – напряженность электромагнитного поля, В/м; E_m – амплитуда напряженности, В/м; R – расстояние, м; t – время распространения, с; c – скорость света, м/с; γ – коэффициент затухания в среде, 1/м.

Аналогично, плоская волна имеет представление

$$E(r, t) = \frac{E_m}{2} f\left(t - \frac{R}{c}\right) e^{-\gamma R}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) показывают, что ЭИПВ слабо затухают с расстоянием, особенно при малом коэффициенте затухания γ в воздухе. Также ЭИПВ, по сравнению с другими некондуктивными помехами, имеют наиболее широкую полосу частот спектра (см. таблицу 1). Следовательно, ЭИПВ являются наиболее опасными некондуктивными электромагнитными помехами. Защита от них затрудняется и тем обстоятельством, что практически невозможно добиться достаточного удаления мест

возможной скрытой установки генераторов ЭИПВ (например, на микроавтобусе) от территорий железнодорожной станции и их постоянного контроля силами охраны. С другой стороны, к МПЦ предъявляются особо высокие требования по функциональной безопасности [2]. Поэтому проблема анализа и прогнозирования устойчивости и защищенности МПЦ по отношению к некондуктивным сверхширокополосным импульсным помехам, в том числе ЭИПВ, является крайне важной. Задачей настоящего исследования является рассмотрение путей проникновения этих помех в аппаратуру МПЦ.

Основным методом защиты от некондуктивных помех является электромагнитное экранирование. Эффективность экранирования, в значительной степени определяется наличием в экране неоднородностей: отверстий, щелей, болтовых соединений. Каждая неоднородность является паразитной антенной, которая передает некондуктивную помеху внутрь объема, защищенного экраном [8].

Восприимчивость паразитных апертурных антенн в виде прямоугольных и круглых отверстий по [5, 9] характеризует коэффициент использования K_n . По материалам [5] для прямоугольного отверстия $K_n = 1$, а для круглого $K_n = 1/2\pi$ с учетом того, что паразитная антенна имеет крайне низкие допуски по точности. Таким образом, прямоугольные отверстия являются наиболее опасными.

Согласно [10] апертура вырезает часть фронта импульсной электромагнитной волны и образует в плоскости раскрытия импульс той же формы, которую имеет импульс, излученный источником помех. Для определения амплитуды принятого импульса через коэффициент использования записывается уравнение баланса мощности антенны, выраженной через вектор Пойнтинга [7, 11]. При этом предполагается, что вся поглощенная антенной мощность переизлучается внутрь экрана, что допустимо по принципу наилучших условий:

$$\Pi_{\text{прин}} A_{\text{эф}} = \Pi_{\text{изл}} A_{\text{геом}}, \quad (3)$$

где $\Pi_{\text{прин}}$ – принимаемый вектор Пойнтинга, Вт/м²; $A_{\text{эф}}$ – эффективная площадь антенны, м²; $\Pi_{\text{изл}}$ – излучаемый вектор Пойнтинга, Вт/м²; $A_{\text{геом}}$ – геометрическая площадь антенны, м².

По [11] вектор Пойнтинга выражается через напряженность электромагнитного поля в частотном представлении:

$$\Pi = \frac{|\vec{E}(j\omega)|^2}{Z_0}, \quad (4)$$

где \vec{E} – напряженность электромагнитного поля, В/м; ω – круговая частота, рад/с, Z_0 – сопротивление свободного пространства, Ом.

Подстановка (4) в (3) после преобразований дает:

$$\begin{aligned} |\vec{E}_{\text{прин}}(j\omega)|^2 A_{\text{эф}} &= |\vec{E}_{\text{изл}}(j\omega)|^2 A_{\text{геом}}; \\ |\vec{E}_{\text{изл}}(j\omega)|^2 &= |\vec{E}_{\text{прин}}(j\omega)|^2 \frac{A_{\text{эф}}}{A_{\text{геом}}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отношение эффективной и геометрической площадей апертурной антенны по определению есть коэффициент использования. Поэтому амплитуда электромагнитного импульса в раскрытии антенны

$$E_{\text{тизл}} = \sqrt{K_n} E_{\text{мприн}}. \quad (6)$$

Если известна напряженность электромагнитного поля в раскрытии антенны, то электромагнитное поле внутри экрана может быть вычислено по формулам, приведенным в [12].

Восприимчивость паразитных щелевых и штыревых антенн по [13, 14] характеризует эффективная длина $l_{\text{эф}}$. При этом в антенне возникает импульс напряжения U с амплитудой U_m , которые вычисляются по формулам

$$U(j\omega) = l_{\text{эф}} E_{\text{прин}}(j\omega); \quad U_m = l_{\text{эф}} E_{\text{мприн}}. \quad (7)$$

Известное напряжение на антенне дает возможность вычислить электромагнитное излучение от нее внутри экрана по формулам, указанным в [12].

Для расчета эффективной длины антенны справедлива формула [14]

$$l_{\text{эф}} = 2,4 \left(\ln \frac{1}{\rho} - 1 \right) \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (8)$$

где ρ – параметр, численно равный диаметру основания штыревой антенны либо четверти толщины щелевой антенны, м; λ – длина волны, м.

Анализ формулы (8) показывает, что для частот спектра помехи меньших единиц мегагерц эффективная длина будет весьма велика. Во-первых, чем меньше частота, тем больше длина волны. Во-вторых, для паразитных антенн ρ имеет порядок 10^{-3} , тогда порядок $1/\rho$ составит 10^3 . Логарифм же большого числа есть число большое, так как логарифм – строго возрастающая функция. Поэтому для целей анализа проникновения импульсных помех через рассматриваемые антенны допустимо считать эффективную длину равной геометрической длине. Этим объясняется значительное снижение эффективности экранирования при наличии в экране щелей без электромагнитного уплотнения проводящей прокладкой [8].

Из формул (7) следует, что имеется возможность создать с помощью генератора-имитатора помех напряжение, непосредственно приложенное к щели или болтовому соединению и совпадающее с напряжением от некондуктивной помехи. В свою очередь, для апертурных антенн напряжение на антенне и напряженность поля в раскрытии связаны формулами [11, 12]:

– для прямоугольной антенны –

$$E(j\omega) = \frac{U_m f(j\omega)}{b}, \quad (9)$$

– для круглой антенны –

$$E(j\omega) = \frac{U_m f(j\omega)}{r}, \quad (10)$$

где f – комплексная функция частоты; b – длина стороны антенны, м; r – радиус кругового отверстия, м.

Формулы (9) и (10) показывают, что такая же возможность имитации некондуктивных помех имеется и для паразитных апертурных антенн. Таким образом может быть осуществлена косвенная оценка воздействия некондуктивных помех на аппаратуру МПЦ при непосредственном воздействии на неоднородность экрана генератором-имитатором импульсных помех, в том числе электростатического разряда. Если генератор не мо-

жет создать импульс, форма которого совпадает с формой импульса сверхширокополосной помехи, то допустимо воздействие эквивалентным импульсом. В [12] приведены соотношения для вывода условий эквивалентности импульсов, полученные спектрально-энергетическим способом. Условием эквивалентности импульсов является равенство их энергий и активных полос частот. Этот способ дает наиболее адекватные условия эквивалентности для рассматриваемой в статье задачи, так как возможность сбоя или отказа микроэлектронной элементной базы определяется энергией импульса [7], а ширина спектра определяет проникающую способность помехи и должна совпадать у обоих импульсов.

Такая косвенная оценка позволяет сократить объем испытаний, снижает потребность в дорогостоящем испытательном оборудовании, тем самым обеспечивает экономические выгоды для производителей МПЦ.

Изложенные в статье результаты позволяют сделать следующие выводы.

Современные МПЦ являются чувствительными к действию некондуктивных помех. Особенную опасность для них представляют ЭИПВ, так как они обладают особо широкой полосой спектра и высокой амплитудой. Воздействие таких помех недопустимо снижает функциональную безопасность МПЦ.

Основным средством защиты от некондуктивных помех является экранирование. Так как изготовить экраны без неоднородностей по техническим условиям невозможно, а каждая неоднородность является паразитной антенной, снижающей коэффициент экранирования, то необходим анализ проникновения помех через неоднородности электромагнитных экранов.

Свойства паразитных апертурных антенн характеризует коэффициент использования, а свойства паразитных щелевых и штыревых антенн – эффективная длина. Анализ расчетных соотношений показывает, что прямоугольные отверстия и щели представляют собой наиболее опасные неоднородности, так как проникновение помех через них весьма значительно.

Помехи в паразитных антеннах представляют собой импульс поля или импульс напряжения, формы, повторяющей форму импульса источника некондуктивных помех. Амплитуда импульсов в антенне может быть вычислена по (6) и (7) с помощью указанных параметров антенны, которые определяются очень просто.

Имеется возможность косвенно оценить воздействие некондуктивных помех на рецепторы в аппаратуре МПЦ путем воздействия непосредственно на неоднородности экранов генераторами-имитаторами импульсных помех.

Таким образом, осуществленные исследования позволяют решить одну из задач, входящих в состав комплексной проблемы защиты МПЦ от импульсных некондуктивных помех природного, техногенного и преднамерен-

ного происхождения – задачу анализа проникновения помех через неоднородности электромагнитных экранов. Этот анализ позволяет выбрать данные для математического и физического моделирования воздействия помех на аппаратуру МПЦ и, в последующем, для повышения ее помехозащищенности. С учетом обострившейся геополитической ситуации обеспечение помехозащищенности и функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики становится актуальным и для Республики Беларусь и для других стран СНГ.

Автор считает своим долгом высказать искреннюю благодарность д. т. н., профессору К. А. Бочкову за постоянную помощь и поддержку в работе и д. т. н., профессору А. К. Головничу за полезные обсуждения, которые позволили сформулировать проблематику статьи.

Список литературы

- 1 Станционные системы автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников [и др.]; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1997. – 432 с.
- 2 **Бочков, К. А.** Микропроцессорные системы автоматики на железнодорожном транспорте / К. А. Бочков, А. Н. Коврига, С. Н. Харлап. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 254 с.
- 3 **Кравченко, В. И.** Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В. И. Кравченко, Е. А. Болотов, Н. И. Летунова. – М. : Радио и связь, 1987. – 255 с.
- 4 **Гайнутдинов, Р. М.** Прогнозирование электромагнитной обстановки в здании при преднамеренном воздействии широкополосного электромагнитного импульса // Р. М. Гайнутдинов // Технологии ЭМС. – 2010. – № 3(34). – С. 53–63.
- 5 **Лавров, А. С.** Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. – М. : Сов. радио, 1974. – 386 с.
- 6 **Драбкин, А. Л.** Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зуденко, А. Г. Кислов. – М. : Сов. радио, 1974. – 536 с.
- 7 **Аполлонский, С. М.** Расчеты электромагнитных полей / С. М. Аполлонский, А. Н. Горский. – М. : Маршрут, 2006. – 992 с.
- 8 **Кечиев, Л. Н.** Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, В. В. Степанов. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2010. – 470 с.
- 9 Конструкции СВЧ-устройств и экранов / А. М. Чернушенко [и др.]. – М. : Радио и связь, 1987. – 400 с.
- 10 **Никольский, В. В.** Теория электромагнитного поля / В. В. Никольский. – М. : Высш. шк. 1964. – 584 с.
- 11 **Фальковский, О. И.** Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 432 с.
- 12 **Бочков, К. А.** Элементы моделирования электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, Д. В. Комнатный. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 185 с.
- 13 **Хабигер, Э.** Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике / Э. Хабигер. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
- 14 **Фрадин, А. З.** Антенно-фидерные устройства / А. З. Фрадин. – М. : Связь, 1977. – 440 с.

Получено 20.09.2018

D. V. Komnatny. Exposure of non-conductive interferences on hardware components screen-cases of microprocessor interlocking control.

Structures of microprocessor interlocking control are considered and non-conductive electromagnetic interferences, which can exposure to distributed equipment of interlocking control in many points, are analyzed. It is shown, that in modern conditions it is necessary to take in to account destruction of interlock control by electromagnetic impulse of purpose action. The penetration of impulse non-conductive noise through microprocessor hardware components screen-case apertures is researched. Formulas for calculation of voltage and electric intensity of electromagnetic field, shaping in aperture during outside radiation, are obtained. The possibility of this field modeling by direct pulser-simulator exposure on aperture is substantiated.