

УДК 621.391.82, 621.396.6

В.Е. Митрохин, А.В. Ряполов

Защищенность радиоэлектронных систем к дестабилизирующему воздействию электромагнитных полей

Проведена оценка устойчивости элементов радиоэлектронной системы к дестабилизирующему воздействию внешних электромагнитных полей. Исследована эффективность использования экранирующих оболочек при наличии в них технологических отверстий. Исследовано появление наведенных токов и напряжений в кабельных соединениях от импульсного электромагнитного поля.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, экранирование, кабельные соединения, импульсные электромагнитные поля, наведенные напряжения.

Эксплуатация радиоэлектронных систем всегда сопряжена с проблемами, когда присутствует влияние мощных электромагнитных полей. Воздействие полей искусственного или естественного происхождения может приводить к нарушению обработки и передачи информации за счет создания помех в цепях устройства [1]. Нарушение нормальной работы выражается в нестабильности, сбоях, зависаниях, неправильно сформированных выходных сигналах и т.д. При взаимодействии с кабельными соединениями, которые являются неотъемлемой частью компьютерных сетей, систем управления и телекоммуникационных средств, возможно нарушение уровней сигналов, рост коэффициента ошибок, потеря трафика и т.п. В ряде случаев электромагнитные поля индуцируют в кабельных линиях напряжения, которые, достигая аппаратуры обработки информации, приводят к электрическим пробоям и термическим разрушениям. Для эксплуатируемых систем это значительно ухудшает такие показатели информационной безопасности, как целостность и доступность информации.

В этой статье мы кратко приводим результаты работы по расчету воздействия электромагнитных полей на элементы радиоэлектронной системы. В качестве объекта исследования выбрана пара экранированных блоков аппаратуры, соединенных симметричным кабелем передачи данных (рис. 1).

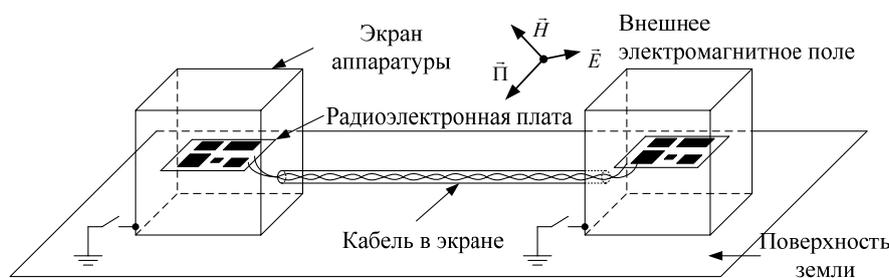


Рис. 1. Схема исследуемой радиоэлектронной системы

Исследование защищенности блоков аппаратуры. Оценка воздействия электромагнитного поля на блоки аппаратуры производилась с помощью метода конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD), широко используемого в решении электродинамических задач СВЧ-диапазона [2]. Метод позволяет исследовать распространение электромагнитных волн в диэлектрических и проводящих средах, но имеет ограничения при моделировании материалов с высокой проводимостью, например металлов. Эти ограничения преодолеваются внесением в стандартный метод FDTD дополнительных способов расчета [3, 4]. Благодаря возможности задавать в трехмерном объеме геометрические особенности исследуемых объектов, метод крайне эффективен при исследовании экранирующих оболочек. Аппаратура размещается в корпусах, где практически всегда присутствуют вентиляционные и технологические отверстия, которые являются путями проникновения электромагнитных полей. Точно воссоздав размеры экрана и отверстий в нем, метод FDTD позволяет еще на этапе разработки узнать, будут ли проникающие электромагнитные поля достигать опасных уровней.

В данном случае габаритные размеры исследуемой экранирующей оболочки взяты $20 \times 40 \times 40$ см. Трехмерное счетное пространство, в котором располагается экран аппаратуры, было разбито на элементарные ячейки кубической формы со стороной 5 мм. Толщина стенки экрана соответствует размеру элементарной ячейки счетного пространства 5 мм. При такой толщине металла электромагнитное поле будет проникать внутрь экрана преимущественно через технологические отверстия. Были рассмотрены варианты экрана с отверстиями диаметром от 5 мм до 15 см. Внешнее электромагнитное поле задавалось двух типов: гармоническое с частотой от 1 МГц до 2 ГГц и импульсное с параметрами фронта и длительности 5/50 нс. Во всех случаях электромагнитное поле принималось как плоская волна с амплитудой напряженности электрического поля 100 В/м. Амплитуда напряженности магнитного поля, согласно соотношению между компонентами плоской волны 377 Ом, равнялась 0,265 А/м.

На рис. 2 представлены в качестве примера картины распределения напряженности электрического и магнитного поля вокруг и внутри экранирующей оболочки с отверстием диаметром 3 см, расположенным в верхней грани. На рис. 2, а, б показано воздействие гармонического сигнала с частотой 1600 МГц. Темные и светлые области показывают изменение напряженности поля в диапазоне от отрицательного до положительного амплитудного значения.

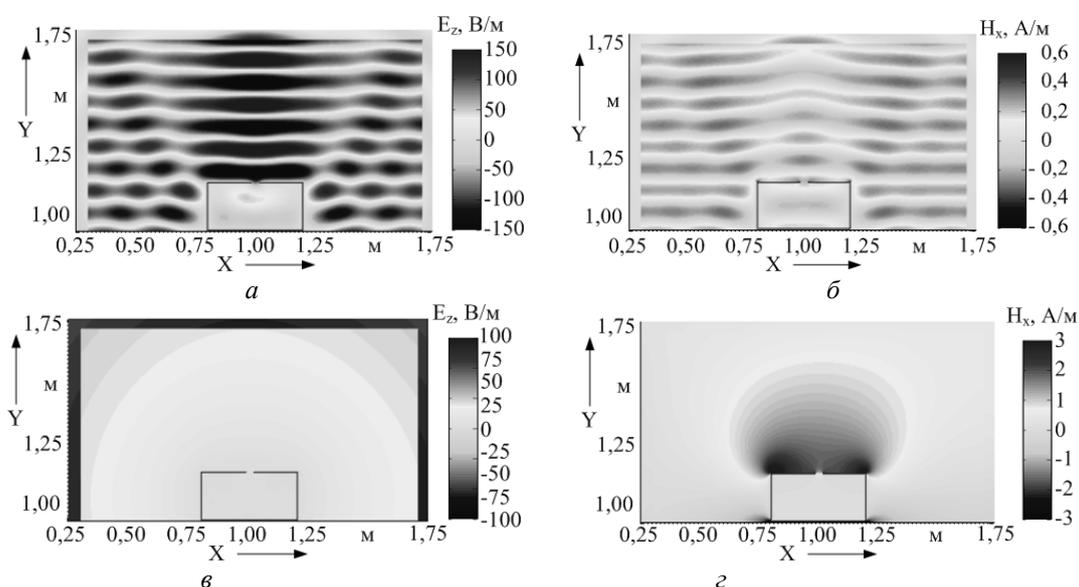


Рис. 2. Картины распределения электрического (слева) и магнитного (справа) полей при воздействии поля на экранирующую оболочку с отверстием: а, б – гармонического; в, г – импульсного

На рис. 3 показаны частотные зависимости напряженностей электрического и магнитного полей, которые были построены по значениям амплитуд, зафиксированных внутри экранирующей оболочки с отверстием 3 см. Можно заметить, что на обоих графиках присутствуют пики, начиная с частоты 800 МГц. Такой резкий рост значений напряженностей объясняется возникновением резонансных явлений внутри объема экрана, что является крайне опасным для работы аппаратуры внутри корпуса. Для приведенного примера меньший из габаритных размеров оболочки, равный 20 см, как раз составляет примерно половину длины волны для частоты 800 МГц. Сравнивая зависимости напряженностей электрического и магнитного полей, можно увидеть большую проникающую способность магнитного поля, в особенности на низких частотах.

Основным показателем эффективности работы экрана является экранное затухание, которое для электрического и магнитного полей рассчитывается на основе отношения значений напряженности при отсутствии и наличии экрана [5]:

$$A_E = 20 \lg \frac{E}{E_0}, \quad A_H = 20 \lg \frac{H}{H_0}. \quad (1)$$

На рис. 4 приведены кривые экранного затухания для электрического и магнитного полей, построенные для экрана с отверстием диаметром 3 см. В расчете использованы значения, приведенные

на рис. 3, и амплитудные значения электрической и магнитной компонент воздействующей плоской волны.

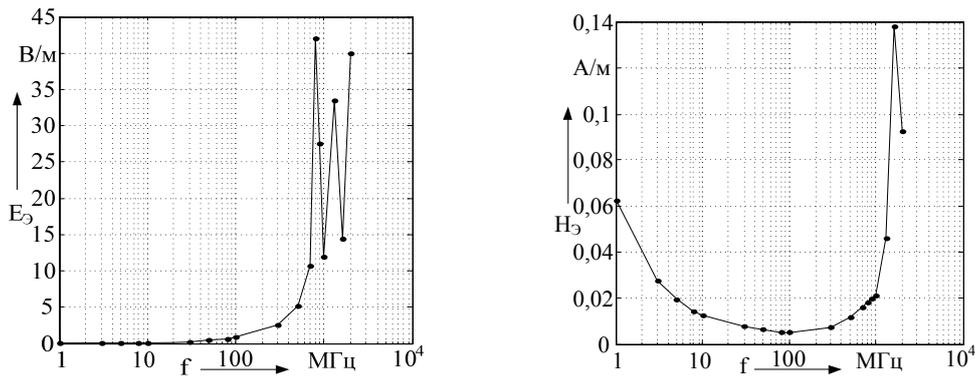


Рис. 3. Частотные зависимости электрического (слева) и магнитного (справа) полей в центре экранирующей оболочки с отверстием диаметром 3 см

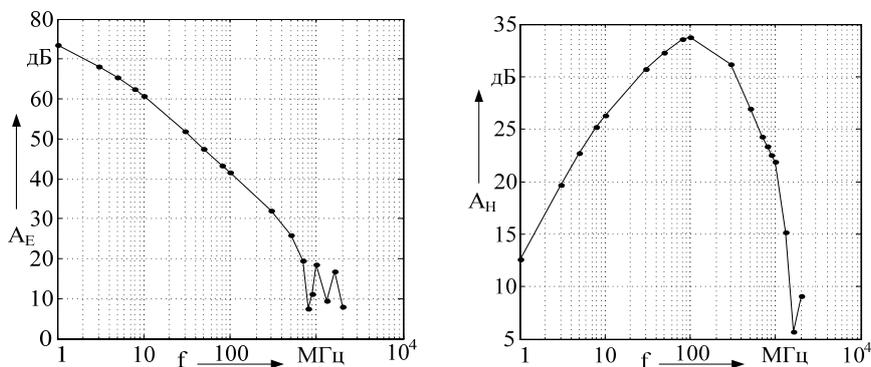


Рис. 4. Частотные зависимости экранного затухания для электрического (слева) и магнитного (справа) полей экранирующей оболочки с отверстием диаметром 3 см

Уменьшение защищенности к магнитному полю на низких частотах (см. рис. 4) приводит к тому, что внутренние цепи радиоэлектронной аппаратуры оказываются уязвимы к воздействию импульсных электромагнитных полей, у которых большая часть энергии расположена в низкочастотной области. На рис. 5 показаны результаты моделирования проникновения импульсного электромагнитного поля с временными параметрами 5/50 нс внутрь экранирующей оболочки с отверстием. Зависимости построены для экранов, где диаметр отверстий изменяется от 5 мм до 15 см.

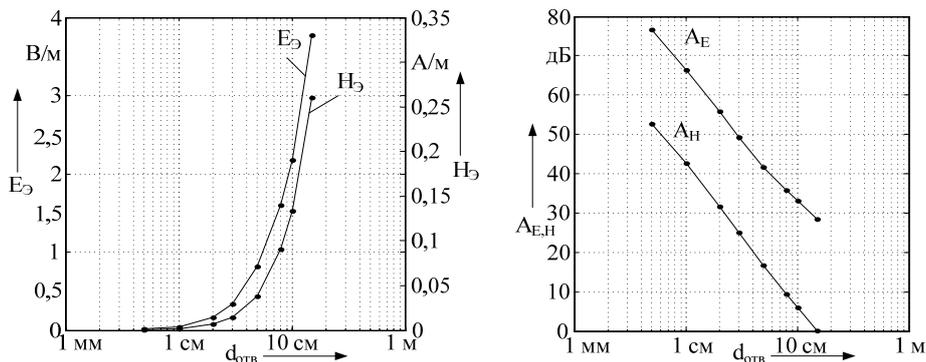


Рис. 5. Изменение электрического и магнитного полей (слева) и экранного затухания (справа) в зависимости от диаметра отверстия в экране

Из графиков на рис. 5 видно, что напряженность электрического и магнитного полей резко увеличивается, и при достижении диаметра отверстия в несколько сантиметров эти значения достигают того уровня, который способен привести к появлению помех во внутренних цепях. Экранное затухание для электрического поля снижается до значения менее 30 дБ, а защищенность от магнитного поля при отверстии диаметром 10 см и более пропадает практически полностью.

Исследование влияния на кабельные соединения. Источником нарушения целостности информации при передаче сигналов по кабелям в аппаратуре и между отдельными блоками выступают наведенные напряжения и токи. В экранированных цепях индуктированное напряжение и ток появляются, прежде всего, в цепи экрана [6]:

$$\dot{U}_{\text{экp}}(\omega, x) = \dot{E}(\omega) \left[\frac{\text{ch}(\ln\sqrt{p_{\text{H}}}) \text{ch}(\gamma_{\text{экp}}(\omega) \cdot (l_{\text{K}} - x) - \ln\sqrt{p_{\text{K}}}) - \text{ch}(\ln\sqrt{p_{\text{K}}}) \text{ch}(\gamma_{\text{экp}}(\omega) \cdot x - \ln\sqrt{p_{\text{H}}})}{\gamma_{\text{экp}}(\omega) \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{экp}}(\omega) \cdot l_{\text{K}} - \ln\sqrt{p_{\text{H}} p_{\text{K}}})} \right]; \quad (2)$$

$$\dot{I}_{\text{экp}}(\omega, x) = \frac{-\dot{E}(\omega)}{Z_{\text{прод}}} \left[1 - \frac{\text{ch}(\ln\sqrt{p_{\text{H}}}) \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{экp}}(\omega) \cdot (l_{\text{K}} - x) - \ln\sqrt{p_{\text{K}}}) + \text{ch}(\ln\sqrt{p_{\text{K}}}) \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{экp}}(\omega) \cdot x - \ln\sqrt{p_{\text{H}}})}{\text{sh}(\gamma_{\text{экp}}(\omega) \cdot l_{\text{K}} - \ln\sqrt{p_{\text{H}} p_{\text{K}}})} \right], \quad (3)$$

где $\dot{E}(\omega)$ – наведенная ЭДС, численно равная продольной электрической компоненте действующего электромагнитного поля, В/м; $\gamma_{\text{экp}}(\omega)$ – коэффициент распространения для цепи экрана кабеля, 1/м; l_{K} – длина кабеля, м; x – координата вдоль длины кабеля, м; p_{H} и p_{K} – коэффициенты отражения, показывающие заземление или изолированность от земли начала и конца цепи экрана.

Протекание тока в экране в совокупности с воздействием внешнего поля вызывает появление в кабеле напряжений «жила–оболочка» и «жила–жила»:

$$\dot{U}_{\text{ж-об}}(\omega) = \dot{I}_{\text{экp}}(\omega) \cdot \dot{Z}_{\text{св}}(\omega); \quad (4)$$

$$\dot{U}_{\text{ж-ж}}(\omega) = \dot{U}_{\text{ж-об}}(\omega) \cdot \eta(\omega), \quad (5)$$

где $\dot{Z}_{\text{св}}(\omega)$ – сопротивление связи [7], показывающее проникновение электромагнитной энергии внутрь кабеля, Ом; η – коэффициент чувствительности двухпроводной цепи [8], наиболее точные его значения определяются экспериментально.

На рис. 6 приведены временные зависимости наведенных токов и напряжений в симметричном экранированном кабеле от импульса электрического поля с параметрами длительности 6,4/16 мкс и амплитудой 100 В/м. Экран кабеля соединен с корпусами блоков аппаратуры, но блоки не заземлены ($p_{\text{H}} = 0, p_{\text{K}} = 0$). Расчет проведен в частотной области, затем выполнено обратное преобразование Фурье.

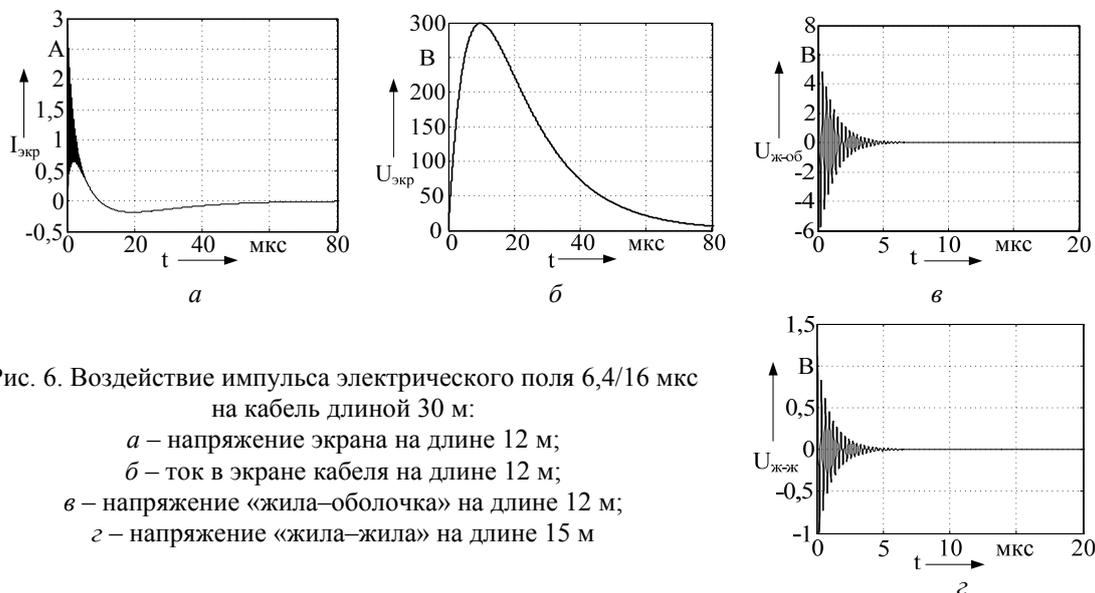


Рис. 6. Воздействие импульса электрического поля 6,4/16 мкс на кабель длиной 30 м:
 а – напряжение экрана на длине 12 м;
 б – ток в экране кабеля на длине 12 м;
 в – напряжение «жила–оболочка» на длине 12 м;
 г – напряжение «жила–жила» на длине 15 м

Графики на рис. 6 свидетельствуют о том, что напряжения «жила–оболочка» и «жила–жила» не достигают значений, способных вывести аппаратуру из строя, но могут повлиять на качество передачи информационных сигналов. Несмотря на небольшую длину кабеля 30 м, наведенное напряжение в экране достигает уровня, при котором возможно опасное воздействие на цепи, имеющие гальваническую связь с экраном кабеля или корпусом аппаратуры.

Заключение. Проведенная работа показала, что использованный подход в исследовании защищенности отдельных частей радиоэлектронных систем к электромагнитным полям позволяет опре-

делить эффективность применяемых защитных средств (экранирование), а также оценить степень дестабилизирующего воздействия, связанного с появлением мощных электромагнитных помех.

Литература

1. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунов. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
2. Taflove A. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method. Second edition / A. Taflove, S.C. Hagness. – Boston: Artech House, 2000. – 866 p.
3. Методика расчета эффективности экранирования радиоэлектронной аппаратуры при воздействии импульсных электромагнитных полей / В.Е. Митрохин, А.В. Ряполов, А.Е. Гаранин // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 72–78.
4. Hybrid numerical technique to predict the electromagnetic field in penetrable conductive boxes / M. Feliziani, F. Maradei // Electromagnetics. – 2002. – Vol. 22. – P. 405–417.
5. Гроднев И.И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. – М.: Связь, 1972. – 112 с.
6. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Связь, 1979. – 264 с.
7. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели. – М.: Радио и связь, 1982. – 120 с.
8. Ряполов А.В. Разработка методики расчета электромагнитного влияния на кабель конечной длины в широком диапазоне частот / А.В. Ряполов, В.Е. Митрохин // Радиотехника, электроника и связь: сб. докладов II Междунар. науч.-техн. конф. ВТТВ РЭС–2013 (Омск). – 2013. – С. 214–220.

Митрохин Валерий Евгеньевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. инфокоммуникационных систем и информационной безопасности Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)
Тел.: 8 (381-2) 31-06-94
Эл. почта: mitrokhin@list.ru

Ряполов Артём Владимирович

Аспирант, инженер каф. инфокоммуникационных систем и информационной безопасности ОмГУПС
Тел.: 8 (381-2) 31-06-94
Эл. почта: a.v.rapolov@gmail.com

Mitrokhin V.E., Ryapolov A.V.

The immunity of the radio electronic system under impact of destabilizing electromagnetic field

The sustainability of the radio electronic system in presence of destabilizing external electromagnetic field is evaluated. The efficiency of the shielding enclosures with technological holes is investigated. The occurrence of induced voltages and currents in the cable connections from pulsed electromagnetic field is researched.

Keywords: electromagnetic compatibility, shielding, cable connection, pulsed electromagnetic field, induced voltage.