

электронного блока УБОП от возможных импульсных помех, возникающих в кабельных цепях питания и связи.

Выводы. Разработанный опытный образец УБОП обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами и может в дальнейшем быть использован в современных КЭО с «интеллектуальной» схемой управления ОББ.

Представленная работа выполняется Национальным исследовательским университетом «МЭИ», совместно с НТУ «ХПИ».

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы: 1. Инструкция по эксплуатации оперативных блокировок безопасности в распределительных устройствах высокого напряжения. РД 34.35.512. – Союзгехэнерго, 1979. 2. Порядок организации оперативной блокировки на подстанциях нового поколения. Приложение к распоряжению ОАО «ФСК ЕЭС» № 236r от 05.05.2010. – Москва, 2010. 3. О.П. Лобак, Г.Г. Семенов Управление разъединителями, сигнализация и блокировки. – М.: Энергия, 1978.

Bibliography (transliterated): 1. Instrukcija po jekspluatacii operativnyh blokirovok bezopasnosti v raspredelitel'nyh ustrojstvah vysokogo naprjazhenija. RD 34.35.512. Sojuzgehjenergo, 1979. 2. Porjadok organizacii operativnoj blokirovki na podstancijah novogo pokolenija. Prilozenie k rasporzjazheniju ОАО "FSK EJeS" № 236r от 05.05.2010. – Moskva, 2010. 3. O.P. Lobak, G.G. Semenov Upravlenie raz#ediniteljami, signalizacija i blokirovki. – M.: Jenergija, 1978.

Надійшла (received) 12.03.2014

УДК 621.391.825

А.И. КОРОБКО, канд. техн. наук, зав. отделом НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ»,

З.И.КОРОБКО, научный сотрудник, НТУ «ХПИ»

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ, НАВОДИМЫХ НА МЕЖЭЛЕМЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Разработана инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на компонентах радиоэлектронных схем соединенных печатными проводниками, сочетающая графическое имитационное моделирование с расчетными методами конечно-разностного типа. Приведен пример реализации разработанной методики для импульсного электромагнитного поля субнаносекундного диапазона.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, радиоэлектронная схема, проводники, печатная плата, наведенные импульсные токи и напряжения.

© А.И. Коробко, З.И.Коробко, 2014

Введение. Одной из важнейших современных проблем является проблема обеспечения стойкости и защищенности радиоэлектронных систем к естественным и преднамеренным воздействиям в виде импульсных электромагнитных полей (ЭМП).

Особое место в классификации видов преднамеренных воздействий занимает импульсное сверхширокополосное ЭМП наносекундного и субнаносекундного диапазонов, свойственное проявлениям электромагнитного терморизма [1].

Одной из основных задач для решения проблемы обеспечения стойкости и защищенности радиоэлектронных систем является задача определения уровня импульсных напряжений и токов, действующих на радиоэлементы с учетом межэлементных соединений печатной платы.

Данная проблема принципиально может быть решена двумя путями: экспериментально или расчетным путем. Экспериментальный метод был в достаточной степени отработан для наносекундного диапазона воздействующих импульсных ЭМП, соответствующего амплитудно-временным параметрам электромагнитного импульса ядерного взрыва. Однако распространение этого накопленного опыта в субнаносекундную область сопровождается значительными трудностями. Эти трудности обусловлены, прежде всего, метрологическими проблемами измерений импульсных напряжений и токов, а также резко увеличивающимся влиянием первичного измерительного преобразователя на точность и достоверность измерений при переходе в субнаносекундную область.

Поэтому экспериментальный метод применяется, в основном, для определения уровней стойкости всей радиоэлектронной системы к поражающему воздействию импульсного ЭМП. Расчетные методы, получившие распространение в последнее время, базируются, в основном, на двух подходах: численное моделирование с использованием графических имитационных моделей фрагментов радиоэлектронных систем [2], или с использованием различных конечно – разностных методов [3 – 7]:

- в чистом виде;
- с использованием гибридных методов, использующих интегральные уравнения и конечно-разностный подход к их решению во временной области [8].

Эти методы дают удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов во временной области [9 – 11], однако характеризуются сложностью применения в инженерной практике (конечно – разностные методы) и недостаточной точностью и ограниченностью применения (имитационные методы).

Цель работы. Целью работы является разработка инженерной методики определения импульсных напряжений и токов, наводимых на компонентах радиоэлектронной схемы, соединенных печатными проводниками, сочетаю-

шей в себе простоту использования методов расчета с графическим имитационным моделированием с точностью и достоверностью методик конечно – разностного типа.

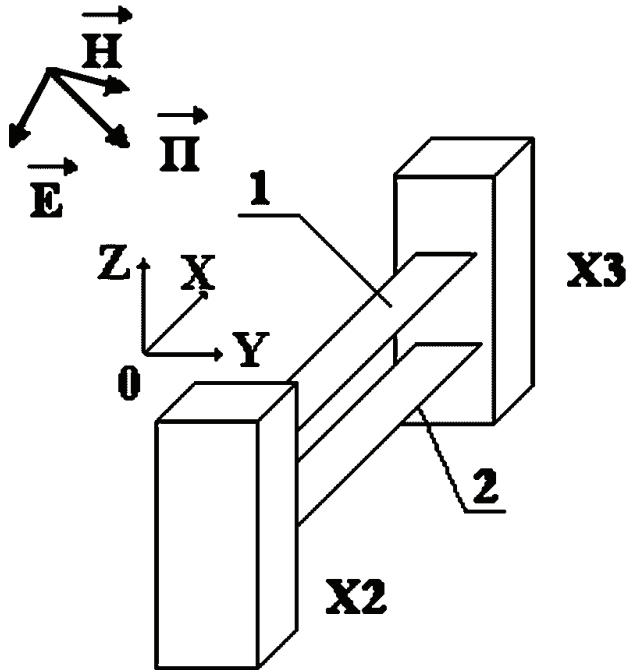


Рисунок 1 – Постановка задачи определения импульсных напряжений и токов, наведенных на радиоэлементах при воздействии импульсного ЭМП на межэлементные проводники печатной платы

Постановка задачи. На рис. 1 представлена в общем виде постановочная часть задачи по определению токов и напряжений, действующих на радиоэлементы, соединенные проводниками на печатной плате.

На часть радиоэлектронного устройства, включающую элементы X2 и X3, соединенные с помощью проводников печатной платы 1 и 2 длиной l , воздействует импульсное ЭМП с заданными ориентацией и амплитудно-временными параметрами. Проводники 1 и 2 расположены параллельно друг другу на расстоянии h , между проводниками находится диэлектрическая среда с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r .

Для решения данной задачи сделаны следующие допущения:

- элементы X2 и X3 являются сосредоточенными;
- проводники печатной платы образуют полосковую линию передачи с волновым сопротивлением Z и основной модой T-типа (время распространения

ния сигнала в поперечном сечении линии существенно меньше длительности фронта воздействующего импульсного ЭМП);

- элементы $X2$, $X3$ и сама линия не влияют на амплитудно-временные параметры воздействующего импульсного ЭМП;
- импульсы напряжения и тока от воздействия импульсного ЭМП наводятся только на проводниках печатной платы.

Описание методики. Электромагнитные процессы на расстоянии x от начала линии T характеризуются схемой замещения, представленной на рис. 2, а.

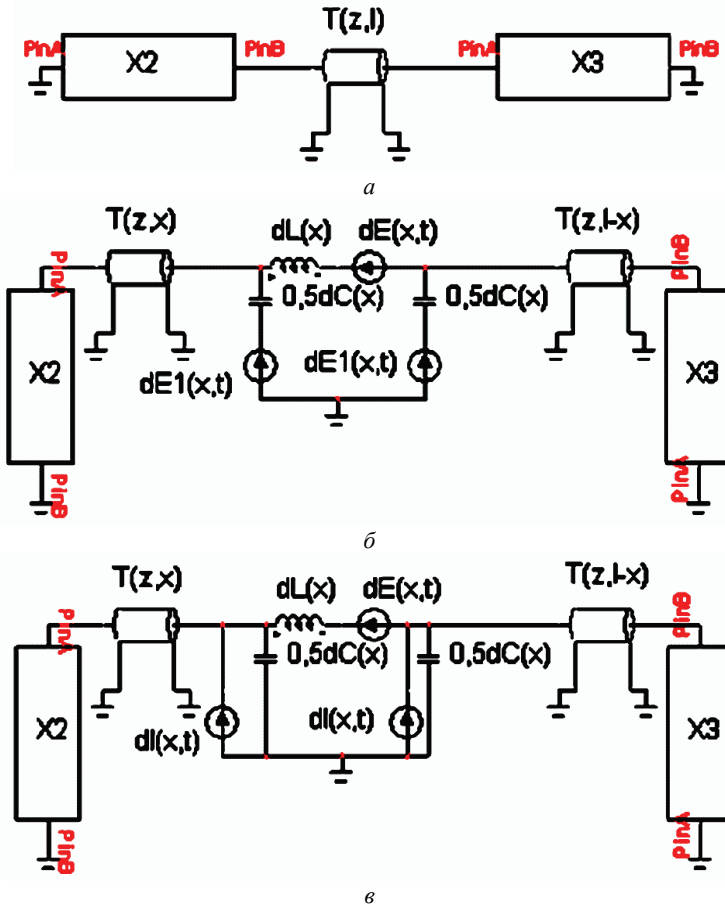


Рисунок 2 – Схема электромагнитных процессов в проводниках печатной платы

При этом линия T на отрезке dx представлена в дифференциальной форме в виде дифференциальных элементов звена Π -типа (рис. 2, б):

- продольной погонной индуктивности dL ;
- поперечной погонной емкости dC ;
- дифференциальной э.д.с. $dE(x,t)$, характеризующей взаимодействие магнитной составляющей падающего импульсного ЭМП с фрагментом схемы;
- дифференциальной э.д.с. $dE1(x,t)$, характеризующей взаимодействие электрической составляющей падающего импульсного ЭМП с фрагментом схемы.

Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы.

1. Разложение электрической и магнитной составляющих падающего ЭМП на составляющие E_z и H_y .
2. Определение времени прихода импульсного ЭМП в точку x линии T (определение $E_z(x,t)$ и $H_y(x,t)$).
3. Определение величин dE и $dE1$:

$$dE(x,t) = h\mu_0 \frac{dH_y(x,t)}{dt} dx; \quad (1)$$

$$dE1(x,t) = \frac{hE_z(x,t)}{\epsilon_r} dx, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

4. Замена источников э.д.с. $dE1$ (с нулевым внутренним сопротивлением) источником тока $dI(x,t)$ (с бесконечным внутренним сопротивлением):

$$dI(x,t) = 0,5dC(x) \frac{dE1(x,t)}{dt} = 0,5 \frac{h}{\epsilon_r} \frac{dE_z(x,t)}{dt} dC(x) dx. \quad (3)$$

Данная замена позволяет существенно упростить дальнейший анализ процессов в схеме рис. 2, в.

Этот анализ может быть проведен как теоретическим, так и численным путем. Особенно эффективным является имитационно-разностный путь анализа, реализованный в средах компьютерного моделирования (например, Micro-Cap).

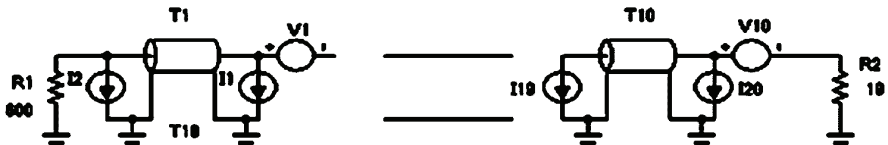


Рисунок 3 – Имитационно-разностная схема моделирования электромагнитных процессов в среде Micro-Cap с числом отрезков линии и количеством источников, равными 10

Данная среда позволяет проводить анализ переходных процессов в схемах, сочетающих радиоэлементы как с распределенными, так и сосредоточенными параметрами. Единственным ограничением среды моделирования

Micro-Cap является невозможность моделирования распределенных источников $dE(x,t)$ и $dI(x,t)$.

Поэтому для анализа переходных процессов необходимо осуществить переход от распределенных источников к сосредоточенным.

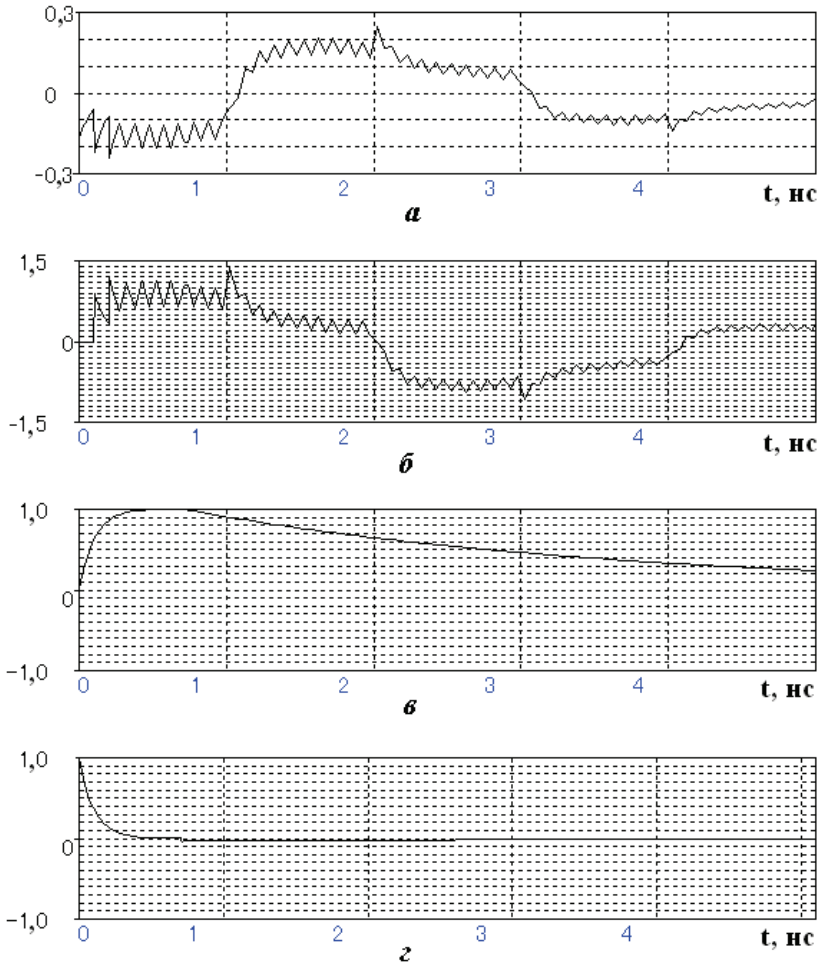


Рисунок 4 – Результаты моделирования электромагнитных процессов в проводнике печатной платы в среде Micro-Cap. *a* – напряжение на элементе X3 (10 Ом); *б* – напряжение на элементе X2 (600 Ом); *в* – временная зависимость падающего ЭМП; *г* – временная зависимость производной по времени падающего ЭМП

То есть осуществить замену распределенных параметров и распределенных источников линии T , конечным количеством отрезков линий и конечным

количеством сосредоточенных источников.

Естественно, что точность и достоверность полученных результатов анализа возрастает с увеличением количества отрезков линий и количества сосредоточенных источников. В общем случае их количество выбирается из условий «продольной квазистационарности» электромагнитных процессов на длине каждого из отрезков линий.

Другими словами время распространения электромагнитной волны по каждому из отрезков должно быть существенно меньше характерных временных параметров источников.

Из анализа выражений (1-3) следует, что для линейного случая максимальные значения источников прямо пропорциональны производной по времени координатных составляющих воздействующего ЭМП. Следовательно, для импульсного ЭМП, воздействующего на межэлементные соединения печатной платы, характерным временем является длительность «фронта» производной от функции, описывающей временную зависимость воздействующего ЭМП.

Полученные результаты. Для иллюстрации возможностей описанной методики был проведен анализ наведенных импульсных токов и напряжений (в относительном виде) в схеме, со следующими параметрами:

- элементы $X2$ и $X3$ имеют чисто активный импеданс равный, соответственно величинам 600 Ом и 10 Ом;
- полосковая линия T (см. рис. 2, *a*) моделировалась десятью одинаковыми звеньями $T1, V1, I1, I2 - T10, V10, I19, I20$;
- волновое сопротивление линий T во всех звеньях одинаково и равно величине 50 Ом;
- время задержки каждого звена равно величине 0,1 нс.

Выводы

1. Для случая элементов, соединенных с межэлементными проводниками печатной платы, максимальные значения импульсов напряжения и тока, наведенных на элементах, прямо пропорциональны производной по времени от функции, описывающей временную зависимость воздействующего ЭМП.

2. В отличие от известных имитационно-разностных методов, использующих разностную схему решений по переменной «время» в данном подходе применен новый метод, использующий разностную схему для представления источников в дискретном виде.

3. Данная методика не имеет принципиальных ограничений по следующим характеристикам:

- линейности как характеристик радиоэлементов, так и линейности схемы замещения проводников печатной платы;
- по виду представления характеристик радиоэлементов (можно использовать все виды моделей элементов, заложенных в среду Micro-Cap – начиная от матрицы s -параметров и кончая Spice-моделями реальных радиоэлементов);

– виду анализа (в частотной или временной области).

4. Точность и достоверность результатов определяются исключительно количеством отрезков линии и источников и достаточно просто контролируется в процессе моделирования (чем выше версия программы Micro-Cap, тем большее количество отрезков линии она позволяет моделировать).

Список литературы: 1. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / Под ред. Т.Р.Газизова. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 206 с. 2. Гайнутдинов Р.Р. Прогнозирование электромагнитных помех в межсоединениях печатных плат цифровых электронных средств при преднамеренном воздействии сверхширокополосного электромагнитного импульса / Р.Р. Гайнутдинов, З.М. Гизатуллин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 3 (34). – С. 44–52. 3. Lee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – May, 1996. – Vol. 14. – P. 302–307. 4. Baum C.E. Electromagnetic topology for the analysis and control of complex systems // Fast Electrical and Optical Measurements. – Thompson J.E. & Heussen L.H.- Nijhoff, Dordrecht, 1986. – Vol. 1. – P. 467-547. 5. Baum C.E., Liu T.K., Tesche F.M. On the analysis of general multiconductor transmission line networks // Interaction Note 461. – January 1988. 6. Cerry G., Russo P. A MFIE-FDTD hybrid method for the evaluation of the field inside metallic enclosures with slots // Proceeding of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, 2003. – P. 653-656. 7. Parmentier J.-P., Lobaune G., Alliot J.-C., Degauque P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach // Interaction Note 488. – May 1988. 8. Marco L. Radiated susceptibility on the Printed-Circuit-Board level: simulation and measurement // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2005. – Vol. 3. – P. 471-478. 9. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology theory on the test – bed aircraft EMPTAC // Interaction Note 506. – Nov. 1993. 10. Parmentier J.-P. at al. Analysis of EM coupling on large scale structures using EM topological concepts: application to the EMPTAC aircraft // Proc. ICEAA'95 Symp. – Torino, 12-15 Sept., 1995. – P. 81-84. 11. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology on the test-bed aircraft EMPTAC-ETE III // Interaction Note 527. – May, 1997.

Bibliography (transliterated): 1. Gajnutdinov, Z.M. Gizatullin Tehnologii jelektrornagnitnoj sovmeshtimosti.- 2010.- №3 (34).- 44 – 52. -ISSN 1729-2670.Jelektrornagnitnyj terrorizm na rubezhe tysjacheletij pod red. T.R.Gazizova. – Tomsk: Tomsnij gosudarstvennyj universitet, 2002. – 206.-ISBN 5-94621-035-1 2. Gajnutdinov R.R. Prognozirovanie jelektrornagnitnyh pomeh v mezhsjoedeninijah pechatnyh plat cifrovyh jelektrornnyh sredstv pri prednamerennom vozdejstvii sverhshirokopolosnogo jelektrornagnitnogo impul'saR.R.. 3. Lee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media IEEE Trans. on Antennas and Propagation.- Vol.14.- May, 1996. – 302 – 307. 4. Baum C.E. Electromagnetic topology for the analysis and control of complex systems Fast Electrical and Optical Measurements. – Vol. 1. – Thompson J.E. & Heussen L.H.- Nijhoff, Dordrecht, 1986. – 467-547. 5. Baum C.E., Liu T.K., Tesche F.M. On the analysis of general multiconductor transmission line networks Interaction Note 461. – January 1988. 6. Cerry G., Russo P. A MFIE-FDTD hybrid method for the evaluation of the field inside metallic enclosures with slots Proceeding of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, 2003. – 653-656. 7. Parmentier J.-P., Lobaune G., Alliot J.-C., Degauque P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach Interaction Note 488. – May 1988. 8. Marco L. Radiated susceptibility on the Printed-Circuit-Board level: simulation and measurement IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2005. – Vol. 3. – 471- 478. 9. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology theory on the test – bed aircraft EMPTAC Interaction Note 506. – Nov. 1993. 10. Parmentier J.-P. at al. Analysis of EM coupling on large scale structures using EM topological concepts: application to the EMPTAC aircraft Proc. ICEAA'95 Symp. - Torino, - 12 – 15 Sept., 1995. – 81-84. 11. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology on the test-bed aircraft EMPTAC-ETE III Interaction Note 527. – May, 1997.

Надійшла (received) 06.03.2014