

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.

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 опре-

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

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 X_2 и X_3 , 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 X_2 и X_3 являются сосредоточенными;
- проводники печатной платы образуют полосковую линию передачи с волновым сопротивлением Z и основной модой T -типа (время распространения сигнала в поперечном сечении линии существенно меньше длительности фронта воздействующего импульсного ЭМП);
- элементы X_2 , X_3 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.

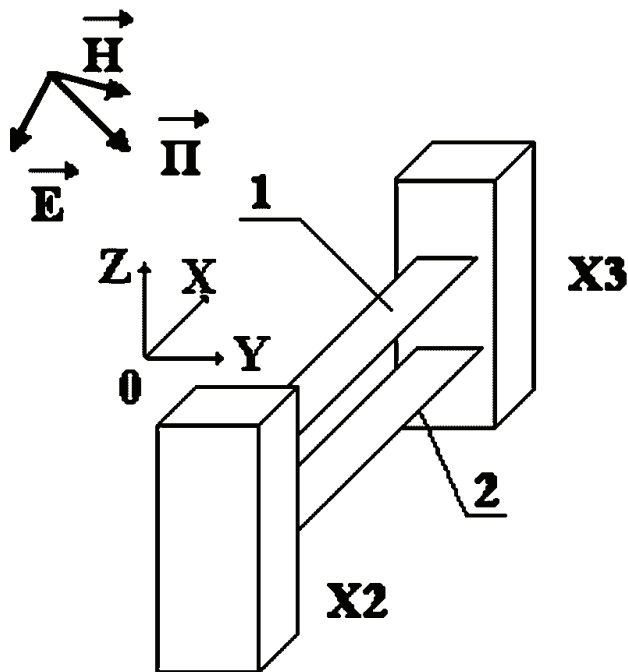


Рисунок 1 – Постановка задачи определения импульсных напряжений и токов, наведенных на радиоэлементах при воздействии импульсного ЭМП на межэлементные проводники печатной платы

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

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 $dE1$:

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

$$dI(x,t) = \frac{hE_z(x,t)}{\varepsilon_r} dx, \quad (2)$$

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):

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

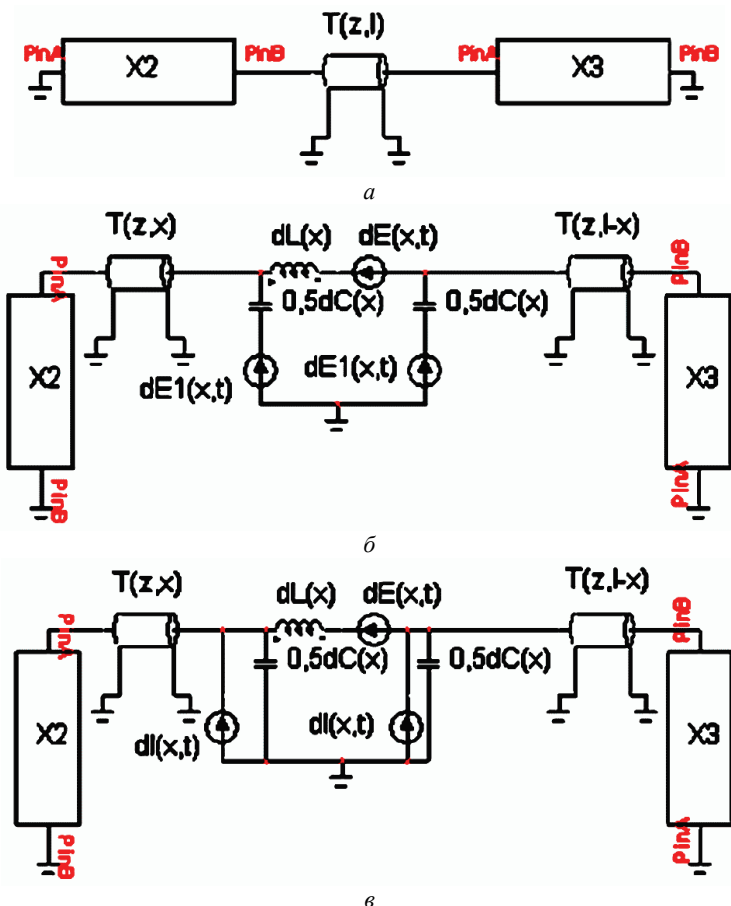


Рисунок 2 – Схема электромагнитных процессов в проводниках печатной платы

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).

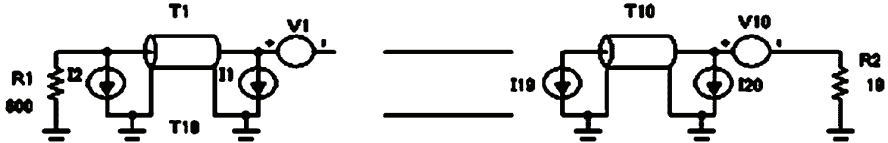


Рисунок 3 – Имитационно-разностная схема моделирования электромагнитных процессов в среде Micro-Cap с числом отрезков линии и количеством источников, равными 10

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.

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.

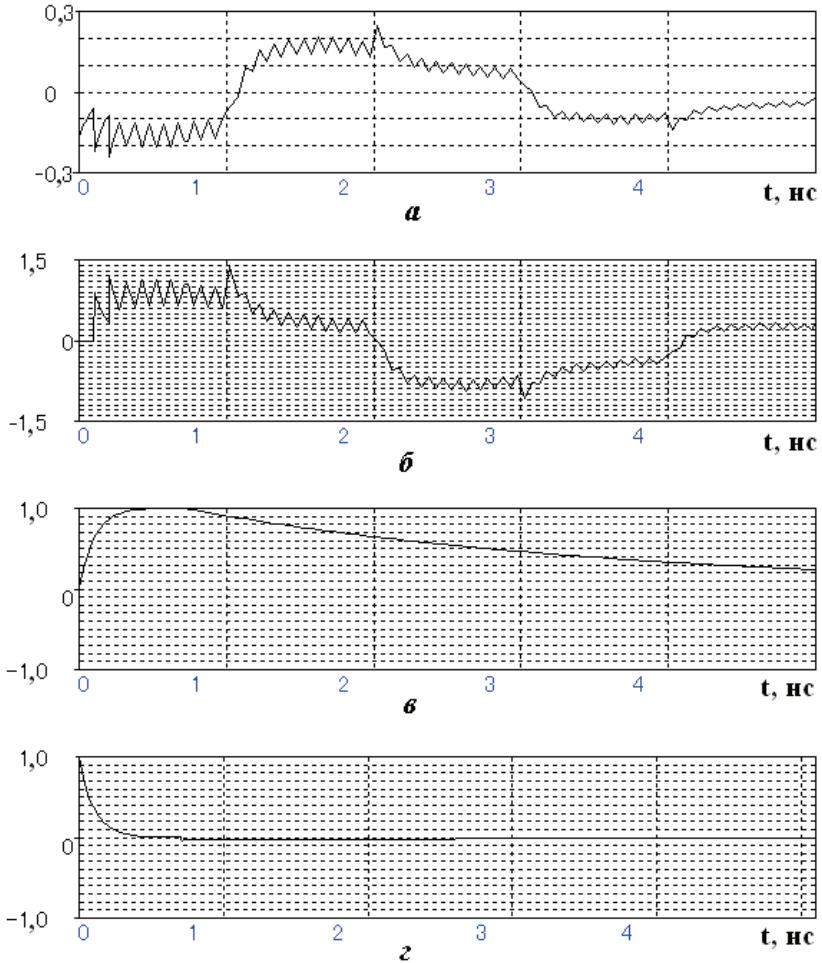


Рисунок 4 – Результаты моделирования электромагнитных процессов в проводнике печатной платы в среде Micro-Cap. a – напряжение на элементе $X3$ (10 Ом); $б$ – напряжение на элементе $X2$ (600 Ом); $в$ – временная зависимость падающего ЭМП; $г$ – временная зависимость производной по времени падающего ЭМП

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 Space-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., Labaune 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 jelektromagnitnoj sovmeshtimosti.- 2010.- №3 (34).- 44 – 52. -ISSN 1729-2670.Jelektromagnitnyj terrorizm na rubezhe tysjach-

eletij pod red. T.R.Gazizova. – Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2002. – 206.-ISBN 5-94621-035-1 **2.** Gajnutdinov R.R. Prognozovanie jelektromagnitnyh pomeh v mezhsoedinenijah pechatnyh plat cifrovyyh jelektronnyh sredstv pri prednamerennom vozdejstvii sverhshirokopolosnogo jelektromagnitnogo impul'saR.R. **3.** Lee K.S. Numeral 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., Labaune 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

УДК 621.391.825

Инженерна методика визначення імпульсної напруги і струмів, що наводяться на між-елементних з'єднаннях друкованої плати при дії імпульсного електромагнітного поля / А.И.Коробко, З.И.Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 71-78. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблена інженерна методика визначення імпульсних напруг та струмів, наведених на компонентах радіоелектронних схем, з'єднаних печатними провідниками, що містить у собі графічне імітаційне моделювання та розрахункові методи кінцево - від'ємного типу. Наведено приклад реалізації розробленої методики для імпульсного електромагнітного поля субнаносекундного діапазону.

Ключові слова: імпульсне електромагнітне поле, радіоелектронна схема, провідники, печатна плата, наведені імпульсні струми та напруги.

УДК 621.391.825

Инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на межэлементных соединениях печатной платы при воздействии импульсного электромагнитного поля / А.И.Коробко, З.И.Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 71-78. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

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.

Engineering technique of definition of pulse voltage and the currents directed on components of radio-electronic circuits connected printed conductors / А.И.Коробко, З.И.Коробко // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 71-78. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The engineering technique of definition of pulse voltage and the currents directed on components of radio-electronic circuits connected printed conductors, combining graphic imitating modeling with settlement methods certainly difference- type is developed. The example of realization of the developed technique for a pulse electromagnetic field subnanosecond a range is resulted.

Key words: a pulse electromagnetic field, the radio-electronic circuit, conductors, the printed-circuit-board, the induced pulse currents and voltage.