

Bibliography (transliterated): 1. Instrukcija po jekspluatacii operativnyh blokirovok bezopasnosti v raspredelitel'nyh ustrojstvah vysokogo naprjazhenija. RD 34.35.512. Sojuzgehenergo, 1979 g. Print. 2. Ustrojstvo blokirovki operativnih perekljuchenij (UBOP) kompleksa elektrooborudovanija novogo pokolenija. G.M. Koliushko, O.S. Nedzelskyi, H.G. Ponuzhdayeva, R.K. Borisov, S.I.Khrenov, D.I. Kovalev. Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrophizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. No 21 (1064). 66-71. Print. 3. Konstrukcija i termodinamicheskie pokazateli opytnogo obrazca ustrojstva blokirovki operativnyh perekljuchenij UBOP G.M. Koliushko, O.S. Nedzelskij, H.G. Ponuzhdayeva, A.V. Plichko, D.I. Kovalev Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI"; 2014. No50 (1092). 109-114. Print.

Поступила (received) 16.03.2015

УДК 621.391.825

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

З.И. КОРОБКО, науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С РАДИОЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ В РЕЖИМЕ ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ

Рассмотрена модель энергетического взаимодействия сверхширокополосных импульсных электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения с радиоэлектронными системами в режиме обратимых отказов. Проведен анализ двух основных путей образования ложных сигналов на выходах радиоэлектронных систем, которые характеризуют режим обратимых отказов: взаимодействие импульсного электромагнитного излучения с проводниками печатных плат и непосредственное взаимодействие излучения с активными полупроводниковыми элементами, которые являются составными частями радиоэлектронных систем. Представлена расчетная топологическая схема для анализа электромагнитных процессов в разветвленных радиоэлектронных системах. Проведен анализ практической применимости и реализуемости численных решений для расчетной топологической схемы. Рассмотрен механизм взаимодействия импульсного электромагнитного поля с основными элементами радиоэлектронных систем на основе энергетических характеристик этого взаимодействия. Приведены результаты анализа энергетического механизма взаимодействия.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, радиоэлектронная система, обратимый отказ, печатная плата.

Введение. Как известно, процесс взаимодействия мощного импульсного электромагнитного излучения (ИЭМИ) естественного и искусственного про-

© А.И. Коробко, З.И. Коробко, 2015

исхождения с радиоэлектронными системами (РЭС) сопровождается появлением обратимых и необратимых отказов их функционирования [1].

Необратимые отказы функционирования РЭС возможно устранить исключительно путем ремонта или замены поврежденных радиоэлектронных элементов.

При обратимых отказах на сигнальных и информационных выходах РЭС появляются ложные сигналы, не свойственные РЭС в режиме ее нормального функционирования.

Одним из путей образования ложных сигналов, приводящих к обратимым отказам на выходе радиоэлектронных систем при воздействии на них импульсных электромагнитных излучений, является линейное взаимодействие (до момента межпроводникового электрического пробоя) электрической и магнитной составляющих ИЭМИ с проводниками печатных плат.

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

Второй путь образования ложных сигналов на выходах РЭС – это внутрисистемные процессы непосредственного полевого взаимодействия ИЭМИ с радиоэлектронными элементами (РЭЭ), входящими в состав РЭС (как пассивными, активными) [2].

Обзор методов. Данная задача принципиально может быть решена двумя путями: экспериментально или расчетным путем. Экспериментальный метод был в достаточной степени отработан для наносекундного диапазона воздействующих импульсных ИЭМИ, соответствующего амплитудно-временным параметрам электромагнитного импульса ядерного взрыва. Однако распространение этого накопленного опыта в субнаносекундную область сопровождается значительными трудностями, обусловленными метрологическими проблемами измерений импульсных напряжений и токов, а также 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 ИЭМИ. 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, или на основе и гибридных методов, использующих интегральные уравнения и конечно-разностный подход к их решению во временной области [8].

Эти методы дают удовлетворительное совпадение расчетных и экспери-

ментальных результатов во временной области [9-11], однако характеризуются сложностью применения в инженерной практике (конечно-разностные методы) и недостаточной точностью и ограниченностью применения (имитационные методы).

В работе [12] была разработана инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на компонентах РЭС, соединенных печатными проводниками, сочетающая в себе простоту использования методов расчета с графическим имитационным моделированием с точностью и достоверностью методик конечно – разностного типа.

Данная инженерная методика позволяет определять не только характеристики импульсных напряжений и токов, наводимых ИЭМИ на проводниках печатных плат РЭС, но и определить характеристики импульсных напряжений и токов на сигнальных и информационных выходах РЭС, в режиме обратимых отказов.

Типовая топологическая расчетная схема РЭС при этом имеет вид, представленный на рис. 1.

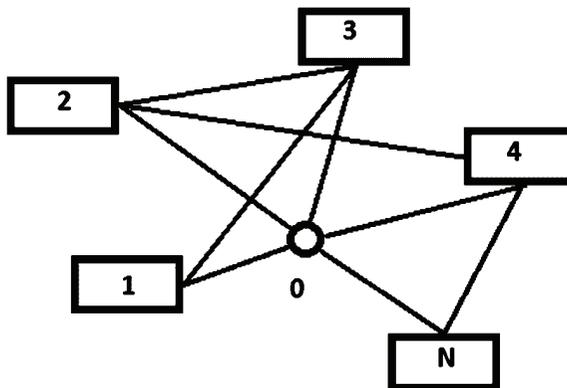


Рисунок 1 – Топологическая расчетная схема взаимодействия ИЭМИ с РЭС: 1,2,3, 4 ... N – радиоэлектронные элементы; 0 – сигнальный выход РЭС; 01, 02, 0,3 ,04... 0N – каналы связи радиоэлектронных элементов с выходом РЭС; 13, 23, 2,4. 2N – межэлементные каналы связи РЭС.

Однако данная методика имеет принципиальное ограничение, обусловленное вычислительными возможностями самой среды графически-имитационного моделирования Micro-Cap [12] – это ограничение максимального числа отрезков длинных линий в имитационной расчетной схеме, которые моделируют взаимодействие проводников печатных плат с ИЭМИ.

Цель работы. Целью работы является проведение качественного анализа энергетического механизма взаимодействия ИЭМИ с РЭС в режиме обра-

тимых отказов для определения предельных энергетических характеристик сигналов на сигнальных и информационных выводах РЭС.

Методика анализа. Как отмечено выше, существуют два основных механизма появления обратимых отказов РЭС в режиме их линейного взаимодействия с ИЭМИ в виде ложных сигналов: непосредственное взаимодействие РЭЭ с ИЭМИ и взаимодействие ИЭМИ с проводниками печатных плат.

При этом топологическая расчетная схема на рис.1, которая включает в себя как РЭЭ, так и каналы связи РЭЭ между собой и с сигнальным выходом РЭС предполагает наличие известных характеристик как источников сигналов, определяемых ИЭМИ, так и трактов (каналов связи) источников с сигнальным выходом РЭС.

РЭЭ и активного и пассивного типов и проводники печатных плат в линейном режиме одинаково взаимодействуют с ИЭМИ – в процессе их взаимодействия электрическая и магнитная энергии ИЭМИ преобразуются в электрическую энергию импульсов напряжений и токов, возникающих на их выводах.

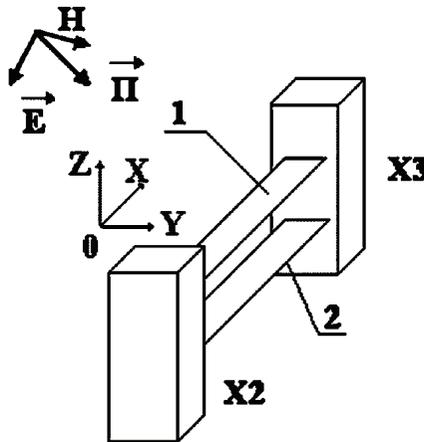


Рисунок 2 – Модель взаимодействия ИЭМИ с проводниками печатных плат (1,2) и РЭЭ (X1, X2)

В общем случае количественные характеристики этих импульсов зависят от ориентации по отношению к векторам ИЭМИ, геометрических размеров проводников и РЭЭ, характеристик подложки и параметров эквивалентных нагрузок (см. рис. 2).

Очевидно, что в самом худшем случае, когда вся энергия ИЭМИ преобразуется энергию наводимых на выводах РЭЭ и проводниках печатных плат, величина последней будет определяться следующим соотношением (во вре-

менном представлении) [13]:

$$W_{\Sigma}(t) = \int_S P_S(t) dt, \quad (1)$$

где $W_{\Sigma}(t)$ – энергия, наводимая на элементе; P_S – поток мощности ИЭМИ через поверхность S радиоэлемента.

В свою очередь $P_S(t)$ определяется выражением:

$$P_S(t) = E_S(t) \cdot H_S(t), \quad (2)$$

где $E_S(t)$, $H_S(t)$ – электрическая и магнитная составляющие ИЭМИ в данной точке поверхности S .

Для случая квазиравномерного облучения области S :

$$E_S(t) = E(t), \quad H_S(t) = H(t),$$

где $E(t)$, $H(t)$ – усредненные электрическая и магнитная составляющие ИЭМИ действующего в области S .

Из анализа (1) и (2) вытекает, что $W_{\Sigma}(t)$ для случая квазиравномерного облучения :

$$W_{\Sigma}(t) = E(t) \cdot H_S(t) \cdot S. \quad (3)$$

Следовательно, максимальные величины $W_{\Sigma}(t)$ будут соответствовать РЭЭ с максимальными величинами площадей S . То есть, энергия, наводимая в проводниках печатной платы существенно превосходит энергию, наводимую в более мелких РЭЭ.

Считая, что на выводах каждого из N радиоэлектронных элементов (см. рис.1) генерируется мощность $P_N(t)$, можно получить выражение для мощности сигнала помехи на выходе РЭС, (которая и обуславливает обратимый отказ РЭС при воздействии ИЭМИ с нулевыми начальными условиями):

$$P_{BNk}(t) = \int_0^t P'_N(\tau) \cdot K_k(t - \tau) d\tau, \quad (4)$$

где $K_k(t)$ – переходная характеристика k -того канала связи N -того РЭС с выходом РЭС.

Очевидно, что полная мощность сигнала помехи, обусловленного появлением обратимого отказа РЭС в линейном режиме определяется соотношением:

$$P_B(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M P_{BNk}(t), \quad (5)$$

где M – полное число каналов связи.

Из анализа (4) и (5) следует, что их максимальная величина P_{BNk} соответствует каналами связи, у которых $|K_k(t)| > 1$, то есть для усилительных каскадов.

Соответственно, импульсная мощность сигнала помехи на выходе РЭС потенциально не может превышать величину импульсной мощности, наводимую на конкретный РЭЭ, умноженную на коэффициент усиления канала по мощности. Разность между импульсной мощностью наводимый на кон-

кретный РЭЭ, и мощностью сигнала помехи есть мощность потребляемая конкретным каналом связи от источника питания РЭС (с учетом к.п.д.).

Выводы.

1. По величине импульсной мощности ложного сигнала на выходе РЭС и характеристическому импедансу информационного выхода РЭС можно оценить величины токов и напряжений ложных сигналов на выходе РЭС, соответствующих обратимым отказам.

2. Основными направлениями уменьшения уровней ложных сигналов, появляющихся на выходе РЭС за счет взаимодействия РЭЭ с ИЭМИ являются:

- оптимальная ориентация отдельных РЭЭ;
- электромагнитное экранирование отдельных РЭЭ и РЭС в целом;
- использование радиопоглощающих покрытий отдельных РЭЭ и РЭС в целом.

3. Из результатов анализа энергообменного взаимодействия вытекает один из перспективных методов диагностики факта возможного появления обратимых отказов путем измерения потребляемого РЭС тока при воздействии ИЭМИ.

4. Данный перспективный метод, в отличие от известных, не требует подсоединения измерительных средств к элементам схем РЭС, он требует подсоединения измерительных средств исключительно по цепи питания РЭС и к его выходу, что, как правило, не вызывает существенных технических затруднений.

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. **12.** *Коробко А.И.* Инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на межэлементных соединениях печатной платы при воздействии импульсного электромагнитного поля / *А.И. Коробко, З.И.Коробко* // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 21 (1064). – С. 71-78. **13.** *Николький В.В. Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука. 1989. – 544 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Jelektromagnitnyj terrorizm na rubezhe tysjacheletijpod red. T.R.Gazizova. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2002. 206. Print. **2.** Gajnutdinov R.R. Prognozirovanie jelektromagnitnyh pomeh v mezhsjoedinenijah pechatnyh plat cifrovyh jelektronnyh sredstv pri prednamerennom vozdejstvii sverhshirokopolosnogo jelektromagnitnogo impul'sa. Gajnutdinov, Z.M. Gizatullin. Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestivosti. 2010. No 3 (34). 44-52. Print. **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. Print. **4.** Baum C.E. Electromagnetic topology for the analysis and control of complexsystems Fast Electrical and Optical Measurements. Vol. 1. Thompson J.E. & Heussen L.H.- Nijhoff, Dordrecht, 1986. 467-547. Print. **5.** Baum C.E., Liu T.K., Tesche F.M. On the analysis of general multiconductor transmission line networks Interaction Note 461. January 1988. Print. **6.** Cerry G., Russo P. A MFIE-FDTD hybrid method for the evaluation of the field inside metallic enclosures with slots Proceedingof IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich, 2003. 653-656. Print. **7.** Parmentier J.-P., Labaune G., Alliot J.-C., Degauque P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach Interaction Note 488. May 1988. Print. **8.** Marco L. Radiated susceptibility on the Printed-Circuit-Board level: simulation and measurement IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. 2005. Vol. 3. 471- 478. Print. **9.** Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology theory on the test – bed aircraft EMPTAC Interaction Note 506. Nov. 1993. Print. **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. Print. **11.** Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology on the test-bed aircraft EMPTAC-ETE III Interaction Note 527. May, 1997. Print. **12.** Korobko A.I. Inzhenernaya metodika opredeleniya impul'snykh napryazheniy i tokov, navodimykh na mezhelementnykh soyedineniyakh pechatnoy platy pri vozdejstvii impul'snogo jelektromagnitnogo polya. A.I. Korobko, Z.I.Korobko. Vestnik NTU «KHPi». Seriya: Tekhnika i yelektrofizika visokikh napryazheniy. Kharkiv: NTU «KHPi», 2014. No21 (1064). 71-78. Print. **13.** Nikol'skiy V.V. Nikol'skaya T.I. Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln. Moscow: Nauka, 1989. 544. Print.

Надійшла (received) 14.04.2015