

УДК 621.396: 621.391.82

БОЧКОВ К.А., д.т.н., професор,

КОМНАТНИЙ Д.В., к.т.н., доцент (Белорусский государственный университет транспорта)

Анализ помех, наведенных в узлах микроэлектронной аппаратуры железнодорожной автоматики при разряде заряженного по индукции корпуса

Рассматриваются помехи, возникающие в узлах электронной аппаратуры ЖАТ при стекании индуцированных электрических зарядов по стенкам корпуса и системе заземления. Разработана схема замещения разрядной цепи корпуса и получено выражение для импульса напряжения на корпусе ТС. Далее рассмотрены наведенные импульсные процессы в схеме замещения входной цепи микросхем узла электронной техники. Получены выражения для импульса напряжения во входной цепи и энергии, рассеиваемой при прохождении импульса во входном сопротивлении микросхемы. Проанализирована устойчивость КМОП и ТТЛ микросхем к помехам от электростатической индукции с помощью расчетов параметров помех по полученным формулам.

Ключевые слова: системы железнодорожной автоматики и телемеханики, широкополосные импульсные помехи, электростатическая индукция, электростатический разряд, наводки в узлах, помехоустойчивость.

Введение и постановка задачи

В настоящее время большое внимание уделяется обеспечению помехоустойчивости микропроцессорной и микроэлектронной техники к мощным сверхширокополосным электромагнитным импульсам. Это объясняется тем, что такие импульсы могут использоваться для преднамеренного воздействия с целью дезорганизации работы хозяйственных и административных объектов, в том числе и железнодорожного транспорта [1, 2]. Среди уже вовлеченных в изучение видов импульсных помех электростатические разряды (ЭСР) отличаются достаточно высокой амплитудой и очень широкой полосой частот спектра. Следовательно, обе разновидности помех обладают сходными свойствами. Их взаимосвязанное исследование может облегчить решение проблемы обеспечения безопасности и электромагнитной совместимости (ЭМС) современных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ).

При рассмотрении вопросов обеспечения устойчивости электронной техники к ЭСР необходимо учитывать большое разнообразие механизмов воздействия этого типа помех на рецепторы помех [3, 4].

В частности наблюдались отказы и сбои аппаратуры ЖАТ, мимо стоек которой проходил несущий паразитный электрический заряд работник. Это явление объясняется электростатической индукцией на корпус электронного технического средства (ТС). Под действием электростатического поля заряда тела оператора на корпусе возникает индуцированный электрический заряд.

После удаления источника поля заряд стекает по корпусу и системе заземления. Возникающий при этом импульс напряжения создает наводки помехового напряжения в узлах электронной техники [5, 6].

Хотя такой механизм возникновения помех от статического электричества часто упоминается в литературных источниках [3, 4, 6], количественные характеристики создаваемых помех остаются недостаточно выявленными и в специально посвященных этому аспекту ЭСР работах [7]. Поэтому степень опасности этих помех остается неясной, что представляется неприемлемым для аппаратуры СЖАТ. С другой стороны в [6] показано, что такие помехи могут вызвать неожиданные и труднообъяснимые отказы и сбои в работе систем управления, в том числе и систем обеспечения безопасности движения поездов.

Современные условия эксплуатации аппаратуры этих систем благоприятствуют накоплению паразитных электростатических зарядов. Следовательно, необходимо апробировать методы анализа помех от электростатической индукции, на основании анализа расчетным путем установить степень опасности таких помех для микроэлектронных ТС ЖАТ.

Основная часть

Рассмотрение физического механизма воздействия на электронные ТС по электростатической индукции показывает, что задача анализа устойчивости к такому виду помех распадается на две последовательные подзадачи. Первая – установление характеристик импульса напряжения, возникающего в процессе стекания заряда с корпуса ТС. Вторая – расчет формы и параметров помех в узлах ТС, вызванных указанным импульсом.

При решении первой подзадачи принимается, что емкость корпуса, получившая некоторый заряд, разряжается через сопротивление корпуса, индуктивность и омическое сопротивление системы заземления. Поэтому в данном случае структурная электрическая модель разрядной цепи сводится к хорошо изученной последовательной RLC-цепи, приведенной на рис. 1.

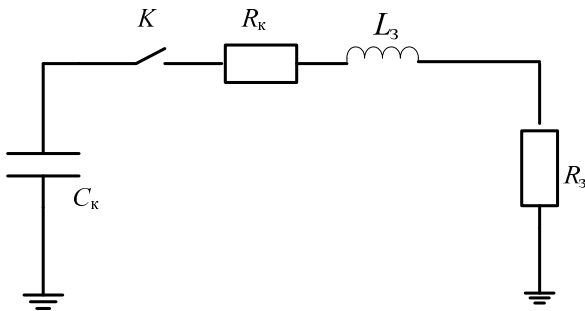


Рис. 1. Структурная электрическая модель разряда предварительно заряженного по индукции корпуса микроэлектронного технического средства

Характер переходных процессов определяется видом корней характеристического уравнения [8]

$$p^2 + \frac{R_k + R_3}{L_3} p + \frac{1}{L_3 C_k} = 0, \quad (1)$$

$$p_{1,2} = -\frac{R_k + R_3}{2L_3} \pm \sqrt{\frac{(R_k + R_3)^2}{4L_3^2} - \frac{1}{L_3 C_k}}; \quad (2)$$

где p – корень характеристического уравнения; R_k – сопротивление корпуса технического средства, Ом; R_3 – сопротивление заземления, Ом; L_3 – индуктивность системы заземления, Гн; C_k – емкость корпуса технического средства, Ф.

Согласно [9] можно принять $R_k=33$ Ом, $R_3=4$ Ом, $L_3=1.5 \cdot 10^{-6}$ Гн. Емкости корпусов технических средств могут быть рассчитаны по известной формуле для емкости прямоугольного параллелепипеда [10]. Расчет корней характеристического уравнения (1) по

формуле (2) для нескольких типов электронных ТС, в том числе шкафа микропроцессорной централизации показал, что при всех значениях емкости корни уравнения оказываются комплексно-сопряженными. Следовательно, переходные процессы имеют колебательный характер.

В процессе электростатической индукции на корпусе рецептора возникает электростатический заряд q . Корпус приобретает потенциал $U=q/C$, где C_k – емкость корпуса. Импульс напряжения при стекании индуцированного заряда с корпуса имеет форму затухающей синусоиды

$$u(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где A – амплитуда импульса, зависящая от начальных условий разряда, В; φ – начальная фаза импульса,

$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega}{\delta}\right)$, рад/с; δ, ω – действительная и мнимая

составляющая корней (2) характеристического уравнения (1).

Начальная фаза импульса (3) не равна нулю, так как до разряда емкости в схеме замещения на рисунке 1, емкость заряжена до потенциала U .

Для расчета помех, наведенных импульсом напряжения на корпусе в узлах электронной аппаратуры, и анализа последствий воздействия этих помех на элементную базу узлов (вторая подзадача), применяется схема замещения [11], показанная на рис. 2.

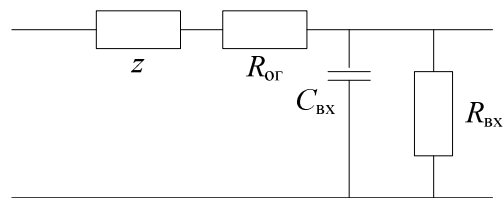


Рис.2. Схема замещения входной цепи микросхемы

Изображение по Лапласу напряжения на выходе схемы замещения имеет вид [11]

$$U_2(p) = U_1(p) \frac{\alpha}{T} \frac{1}{p + \frac{1}{T}}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + z + R_{\text{ог}}},$$

$$T = \frac{C_{\text{вх}} (z + R_{\text{ог}}) R_{\text{вх}}}{z + R_{\text{ог}} + R_{\text{вх}}},$$

где $U_2(p)$ – изображение выходного напряжения, В; $U_1(p)$ – изображение входного напряжения, В; $R_{ог}$ – ограничивающее сопротивление, Ом; z – волновое сопротивление линии связи, Ом; $C_{вх}$ – входная емкость, Ф.

Изображение по Лапласу импульса (3) имеет вид [8]

$$U_1(p) = A \frac{\omega \cos \varphi + (p + \delta) \sin \varphi}{(p + \delta)^2 + \omega^2}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (4) дает изображение напряжения во входной цепи рецептора.

$$U_2(p) = \frac{\alpha A}{T} \frac{\omega \cos \varphi + (p + \delta) \sin \varphi}{[(p + \delta)^2 + \omega^2] \left(p + \frac{1}{T} \right)}. \quad (6)$$

Знаменатель этого операторного выражения имеет один действительный отрицательный и два комплексно-сопряженных корня. Поэтому оригинал может быть найден по известной теореме Хэвисайда [8]. Он имеет вид

$$u_2(t) = \frac{\alpha A}{T} \left[\frac{\omega \cos \varphi + \left(\delta - \frac{1}{T} \right) \sin \varphi}{\left(\delta - \frac{1}{T} \right)^2 + \omega^2} e^{-\frac{t}{T}} + 2Be^{-\delta t} \cos(\omega t + \beta) \right], \quad (7)$$

где обозначено

$$B = \frac{1}{2\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{1}{T} - \delta \right)^2}},$$

$$\operatorname{tg} \beta = - \frac{2\omega \sin \varphi + 2\cos \varphi \left(\frac{1}{T} - \delta \right)}{2\left(\frac{1}{T} - \delta \right) \sin \varphi - 2\omega \cos \varphi}.$$

При вычислении угла β следует учитывать, что этот угол является тупым.

Микросхемы различной технологии производства имеют неодинаковые механизмы повреждения. У микросхем КМОП технологии входное сопротивление очень велико и составляет 10^{12} Ом; рассеиваемая в нем энергия соответственно мала. Основным механизмом

повреждения этих микросхем является пробой входной емкости при превышении амплитудой импульса напряжения помех порогового значения.

По выражению (7) был построен график импульса напряжения во входной цепи узла рецептора, показанной на рисунке 2. Для его построения приняты параметры схемы замещения: $C_{вх} = 5 \cdot 10^{-12}$ Ф, $z = 50$ Ом, $R_{ог} = 150$ Ом, $R_{вх} = 10^{12}$ Ом (для микросхемы КМОП типа). Параметры входного импульса для объекта емкостью $3,13 \cdot 10^{-12}$ Ф, и зарядом на корпусе $1 \cdot 10^{-9}$ Кл, $\delta = 1.233 \cdot 10^7$ 1/с, $\omega = 2.162 \cdot 10^8$ рад/с. График приведен на рис. 3.

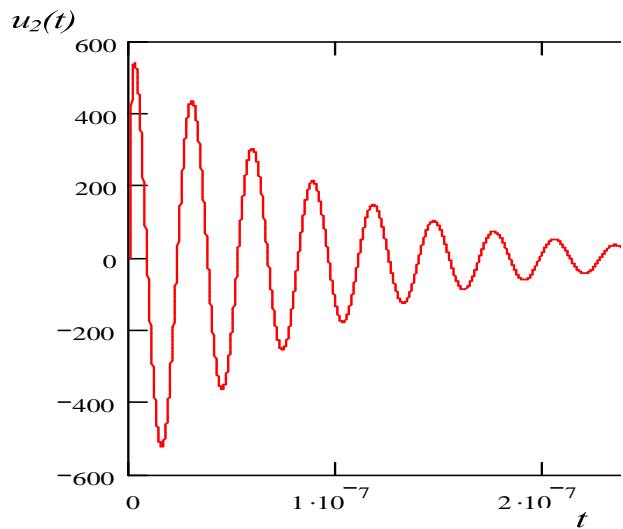


Рис. 3. Импульс, наведенный во входных цепях узла электронной аппаратуры при стекании индуцированного разряда

Из рисунка 3 следует, что при стекании индуцированного на корпусе заряда в узлах рецептора возникает импульс затухающих колебаний. Амплитуда этого импульса превышает амплитуду импульса, безопасную для КМОП микросхем производства Республики Беларусь [12].

Микросхемы ТТЛ и ТТЛШ имеют значительно меньшее входное сопротивление. Для этих микросхем основным механизмом повреждения является тепловой пробой входного сопротивления при превышении энергией импульса порогового значения [13].

Энергия импульса вида (7) рассчитывается по формуле

$$W = \frac{1}{R_{вх}} \int_0^{\infty} u^2(t) dt = \frac{A^2 \alpha^2}{R_{вх} T^2} \int_0^{\infty} \left(De^{-\frac{t}{T}} + 2Be^{-\delta t} \cos(\omega t + \beta) \right)^2 dt; \quad (8)$$

где обозначено

$$D = \frac{\omega \cos \varphi + \left(\delta - \frac{1}{T} \right) \sin \varphi}{\left(\delta - \frac{1}{T} \right)^2 + \omega^2}.$$

Выражение (8) может быть представлено в виде

$$W = \frac{A^2 \alpha^2}{R_{\text{вх}} T^2} (I_1 + I_2 + I_3). \quad (9)$$

В соотношении (9)

$$I_1 = \int_0^{\infty} D^2 e^{-\frac{2t}{T}} dt = \frac{D^2 T}{2}. \quad (10)$$

В свою очередь

$$I_2 = \int_0^{\infty} 4BD e^{-\delta t} e^{-\frac{t}{T}} \cos(\omega t + \beta) dt.$$

Этот интеграл можно вычислить по формуле интегрирования по частям

$$I_2 = 4BD \frac{\left(\delta + \frac{1}{T} \right) \cos \beta - \omega \left(\delta + \frac{1}{T} \right) \sin \beta}{\omega^2 \left(\delta + \frac{1}{T} \right)^2 + 1}. \quad (11)$$

Наконец

$$I_3 = \int_0^{\infty} 4B^2 e^{-2\delta t} \cos^2(\omega t + \beta) dt.$$

Подынтегральное выражение в I_3 может быть преобразовано с помощью формулы косинуса двойного аргумента, после чего интеграл вычисляется по формуле интегрирования по частям

$$I_3 = 4B^2 \left[\frac{1}{2\delta} + \frac{2\delta \cos 2\beta - 8\omega \delta^2 \sin 2\beta}{16\omega^2 \delta^2 + 1} \right]. \quad (12)$$

По соотношениям (9), (10), (11) и (12) была рассчитана энергия помех в узле того же объекта, но при использовании ТТЛ микросхем, как элементной базы узла. Параметры ТТЛ микросхемы принимались по [14] и [15]: $C_{\text{вх}} = 12 \cdot 10^{-12}$ Ф, $R_{\text{вх}} = 1,52 \cdot 10^6$ Ом.

Расчеты показали, что энергия помехи составляет $8,733 \cdot 10^{-9}$ Дж, такой уровень помех не является опасным для ТТЛ микросхем [13].

Выводы

Результаты расчетов параметров помех, которые возникают в узлах микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры при стекании индуцированных внешними источниками электростатического поля зарядов с корпуса этой аппаратуры позволяют сделать следующие выводы.

Рассмотренный вид помех может вызвать сбой в работе узлов построенных на базе КМОП микросхем. Для ТТЛ микросхем он не представляет опасности. Но КМОП микросхемы находят все более широкое применение, следовательно, опасность рассматриваемых помех для электронной техники будет возрастать.

Форма и параметры импульсов помех, возникающих в узлах ТС, резко отличаются от импульсов прямого и воздушного ЭСР и импульсов генератора-имитатора этих импульсов. Поэтому испытания по апробированным методикам не выявляют устойчивость к импульсам помехового напряжения от стекания паразитных электрических зарядов.

Известно [6], что идентифицировать отказы и сбои, вызванные электростатической индукцией с источника помех в виде заряженного персонала, достаточно трудно.

Поэтому оценка с помощью математического моделирования параметров таких помех является существенным дополнением к испытаниям систем ЖАТ по ГОСТ Р 516.312.4. – 2001. Таким образом, можно исследовать помехоустойчивость к виду помех, не охватываемому стандартными процедурами испытаний, но представляющему опасность для микроэлектронной техники. Исключение возможности отказа или сбоя из-за электростатической индукции позволяет обеспечить повышенный уровень безопасности эксплуатации микропроцессорных и микроэлектронных СЖАТ в электромагнитной обстановке современных диспетчерских центров и центров управления.

Следовательно, предложенные в работе методы и модели для анализа помех могут оказать значительную помощь в решении актуальных задач разработки и эксплуатации современных систем ЖАТ и имеют существенное прикладное значение.

Литература

1. Гизатуллин З. И. Технология прогнозирования и повышения электромагнитной совместимости цифровых электронных средств при внешних высокочастотных импульсных воздействиях // Технологии ЭМС – 2010. – № 3(34). – С. 22–29.

2. Гайнутдинов Р.М. Прогнозирование электромагнитной обстановки в здании при преднамеренном воздействии сверхширокополосного электромагнитного импульса // Технологии ЭМС – 2010. – № 3(34). – С. 53–63.
 3. Кечиев Л. Н., Пожидаев Е. Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
 4. Рябов Ю.Г. Обеспечение ЭМС рабочих мест, производства и эксплуатации продукции при воздействии статического электричества // Новое в электромагнитной совместимости. – 1994.– №1. – С. 36-37.
 5. Тэнессеку Ф., Р. Крамарюк Электростатика в технике – М.: Энергия, 1980. 296 с.
 6. Справочник по помехам: перевод с японского материала фирмы «Нойдзу кэнкюсе» / «Нойдзу кэнкюсе». – М.: ВИНТИ, 1985. – 214 с.
 7. Brown B. S., Rauth L. L. Finite element time domain simulation of electrostatic discharge using mixed-dimensional finite elements / B. S. Brown, L. L. Rauth // 1994 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y., 1994. – P. 95 – 98.
 8. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 773 с.
 9. Файзулаев Б. Н., Логачев В. В., Оршевский В.В. Исследование нечувствительности электронного оборудования при моделировании непрямого электростатического разряда (на англ. языке) // Fifteenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility / Wroclaw Polytechnic Institute. – Wroclaw : Wroclaw Polytechnic Institute, 2000. P. 469-473.
 10. Иоссель Ю. Я., Кочанов И. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. – М.: Энергия, 1969. – 240 с.
 11. Кравченко В. И., Болотов Е. А., Летунова Н. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 255 с.
 12. Логические ИС КР1533, КР1554. Справочник, ч.1. – М.: Бином, 1993. – 253 с.
 13. Аполлонский С. М., Горский А. Н. Расчеты электромагнитных полей. – М.: Маршрут, 2006. – 982 с.
 14. Нефедов А. В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги. Справочник. Т. 6. – М.: РадиоСофт, 1998. – 544 с.
 15. Нефедов А. В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги. Справочник. Т. 5. – М.: Кубк-а, 1997. – 608 с.
- Бочков К. А., Кімнатний Д. В. Аналіз перешкод, наведених у вузлах мікроелектронної апаратури залізничної автоматики при розряді зарядженого по індукції корпусу.** Розглядаються перешкоди, що виникають у вузлах електронної апаратури ЗАТ при стіканні індукованих електричних зарядів по стінках корпусу і системи заземлення. Розроблено схему заміщення розрядного ланцюга корпусу та отримано вираз для імпульсу напруги на корпусі ТЗ. Далі розглянуто наведені імпульсні процеси в схемі заміщення вхідного ланцюга мікросхем вузла електронної техніки. Отримані вирази для імпульсу напруги у вхідному ланцюзі та енергії, що розсіюється при проходженні імпульсу у вхідному опорі мікросхеми. Проаналізовано стійкість КМОП і ТТЛ мікросхем до перешкод від електростатичної індукції за допомогою розрахунків параметрів перешкод за отриманими формулами.
- Ключові слова:** системи залізничної автоматики і телемеханіки, широкосмугові імпульсні перешкоди, електростатична індукція, електростатичний розряд, наведення у вузлах, завадостійкість.
-
- Bochkov K. A., Komnatny D. V. The analysis of interferences, induced in railway automatics microelectronic apparatus assemblies, while discharging charged by induction case .** Interferences, taking place in railway automatics electronic apparatus assemblies, while induced charges are draining down the case walls and ground system are considered. The equivalent circuit of a case discharge circuit has been developed, and the expression for voltage impulse on hardware component case has been obtained. Further, induced impulse processes in equivalent circuit of microcircuit input circuit of electronic engineering assembly are considered. The expressions for voltage impulse in the input circuit and for energy, dissipated when the impulse is passing in integrated circuit input resistance have been obtained. The immunity of CMOS and TTL microcircuits to interferences from electrostatic induction has been analyzed by means of interference parameters calculation according to obtained formulae.
- Key words:** systems of railway automatics and telemechanics, electrostatic induction, high bandwidth interferences, electrostatic discharge, interference induction in assemblies, noise immunity.
- Рецензент д.т.н., професор Бабаев М.М. (УкрГАЗТ)

Поступила 12.11.2013г.