

8 **Ефанов, Д. В.** Отказоустойчивые структуры цифровых устройств на основе логического дополнения / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 8. – С. 140–158. – DOI: 10.31857/S0005231021080079.

9 Fault-Tolerant Self-Dual Circuits with Error Detection by Parity- and Group Parity Prediction / V. Ocheretnij [et al.] // 4th IEEE International On-Line Testing Workshop, July 6–8, 1998, Capri, Italy.

10 **Saposhnikov, Vl. V.** Design of Fault-Tolerant Circuits by Self-Dual Duplication / Vl. V. Saposhnikov // Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems : 2nd International Workshop, September 2–4, 1998, Szczyrk, Poland.

УДК 656.25

ПРИМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ПРИ КОМПЛЕКСИРОВАНИИ ИСПЫТАНИЙ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

Д. В. КОМНАТНЫЙ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

В научно-технической периодике по проблеме электромагнитной совместимости радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники поставлена задача сопоставления испытаний указанной техники на устойчивость к электромагнитным помехам различной природы. Для сокращения числа испытаний и затрат времени на них предлагается разрабатывать такие процедуры испытаний, при которых по результатам испытаний на устойчивость к определенному виду импульсных электромагнитных помех можно было бы косвенно судить об устойчивости того же технического средства (ТС) к другим видам помех.

Особенную актуальность эта задача приобрела с появлением новых видов электромагнитных помех. В современных условиях существует угроза применения электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия (ЭИПВ), которые отличаются высокой амплитудой, сверхширокой полосой частот и, следовательно, высокой проникающей способностью. Угроза усиливается, так как разработаны конструкции компактных генераторов, доступных экстремистским группировкам. Степень устойчивости электронной и микропроцессорной техники к этому виду помех определяется путем лабораторных испытаний. Это требует наличия испытательных генераторов, которые являются уникальными установками. Поэтому для массовых испытаний оборудования систем обеспечения безопасности движения поездов косвенные оценки устойчивости этого оборудования к ЭИПВ становятся особенно актуальными. Техническая возможность косвенных оценок обеспечивается наличием генераторов-имитаторов помех, обладающих широкой полосой спектра, в частности генераторов электростатического разряда. Методическая возможность – методикой и математическим аппаратом для сравнения импульсов помех различной формы.

В лаборатории «Безопасность и ЭМС» НИИЖТА при БелГУТе разработаны два способа вывода условий эквивалентности импульсов: спектрально-энергетический и интегральный.

В интегральном способе условием эквивалентности является равенство энергии и вольт-секундной площади импульсов. Таким образом, сравниваются параметры, от которых зависят последствия воздействия импульса на рецептор помех – микроэлектронный узел. Энергия импульса помехи определяет возможность отказа или сбоя узла. Вольт-секундная площадь – возможность того, что импульс будет принят за информационный. Помехи к рецептору проникают по цепям передачи информации и цепям питания, таким образом, являются кондуктивными. Как правило, кондуктивные помехи возникают при переходных процессах. Поэтому их форма описывается импульсом включения, экспоненциальным, биэкспоненциальным импульсами, а также импульсом в виде затухающей синусоиды. Выражения для энергии и вольт-секундной площади таких импульсов легко получить по известным теоремам спектрального анализа. Так, для экспоненциального импульса

$$W = \frac{A^2}{2\beta}, \quad Q = \frac{A}{\beta}, \quad (1)$$

для биэкспоненциального импульса

$$W = A^2 \left[\frac{1}{2\gamma\beta_2} - \frac{2}{\beta_2(\gamma+1)} + \frac{1}{2\beta_2} \right], \quad Q = A \frac{\beta_2(\gamma-1)}{\gamma\beta_2^2}, \quad (2)$$

где W – энергия импульса, Дж; A – амплитуда импульса, В; β_1, β_2 – временной параметр импульса, с^{-1} ; Q – вольт-секундная площадь импульса, В·с; γ – отношение временных параметров экспонент биэкспоненциального импульса.

Подавляющее большинство сверхширокополосных импульсных помех, в том числе ЭИПВ, являются некондуктивными. Поэтому они проникают в цифровые узлы аппаратуры автоматики не напрямую, а через паразитные антенны – неоднородности в корпусах рецептора. Представляется, что эквивалентные некондуктивные импульсы должны обладать одинаковой энергией и иметь одинаковую активную полосу частот. От уровня энергии зависят последствия воздействия помех на элементную базу. Следовательно, в паразитную антенну от разных импульсов должна поступать одинаковая энергия, которая затем передается в рецепторы при пренебрежимо малых потерях. Активная полоса частот определяет проникающую способность импульсов. Поэтому целесообразно использовать спектрально-энергетический способ вывода условий эквивалентности импульсов, в котором условием эквивалентности является равенство энергий импульсов и равенство их активных полос частот.

ЭИПВ обладают весьма разнообразными формами. В научной литературе рассматриваются ЭИПВ в виде гауссова импульса, биэкспоненциального импульса, усовершенствованного биэкспоненциального импульса, полиэкспоненциального импульса, колоколообразного импульса и др.

Энергия наиболее распространенных сверхширокополосных импульсных помех вычисляется по формулам:

– биэкспоненциальный импульс – по (2);

– триэкспоненциальный импульс вида $u(t) = A(1 - e^{-\beta_1 t})^2 e^{-\beta_2 t}$ –

$$W = A^2 \left(\frac{1}{2\beta_2} + \frac{6}{2(\beta_1 + \beta_2)} - \frac{7}{2(2\beta_1 + \beta_2)} - \frac{4}{3\beta_1 + 2\beta_2} \right); \quad (3)$$

– гауссов $W = A^2 \tau \sqrt{\frac{\pi}{2}}$, (4)

где u – мгновенное значение напряжения импульса, В; t – время, с; β_1, τ – временные параметры импульсов, с^{-1} .

Расчет активной полосы частот по основному уравнению или методом моментов наталкивается на значительные математические трудности. Из рассмотренных выше импульсов основное уравнение имеет наиболее простой вид для гауссова импульса. Но оно содержит неэлементарную функцию – интеграл Лапласа, таким образом, записывается в виде

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \Phi\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) = 0,95, \quad (5)$$

где Φ – интеграл Лапласа; ω – круговая частота, рад/с.

Решение уравнения (5) возможно с помощью различных оценок, что дает значение активной полосы частот $\omega = \frac{3,5}{\tau}$.

Для биэкспоненциального и триэкспоненциального импульса основное уравнение и метод моментов приводят к еще более сложным трансцендентным уравнениям. Поэтому для вычисления активной полосы частот применяется графический метод, основанный на построении интегральной кривой распределения энергии в спектре $\gamma(f)$, по выражению

$$\gamma(f) = \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta 2\pi f} F^2(2\pi f) d 2\pi f}{W}, \quad (6)$$

где f – циклическая частота, Гц; $\Delta 2\pi f$ – частота – предел интегрирования, рад/с; F – модуль спектральной функции импульса, В·с.

По графику кривой находится значение активной полосы частот импульса, соответствующее значению $\gamma(f) = 0,95$. Активная полоса частот выражается через параметры импульса.

Для расчета интегральной кривой требуются выражения для модуля спектральной функции. Эти выражения имеют следующий вид:

– для биэкспоненциального импульса

$$F(\omega) = \frac{A\beta_2(1-\gamma)}{\sqrt{(\gamma\beta_2^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\beta_2^2(1+\gamma)^2}}; \quad (7)$$

– для триэкспоненциального импульса

$$F(\omega) = A \left[\frac{4\beta_1^2 + 6\beta_1\beta_2 + 3\omega^2}{(\beta_2^2 + \omega^2)[(2\beta_1 + \beta_2)^2 + \omega^2]} - \frac{4\beta_1\beta_2}{(\beta_2^2 + \omega^2)[(\beta_1 + \beta_2)^2 + \omega^2]} - \frac{(\beta_1 + \beta_2)(5\beta_1 + 3\beta_2 + 3\omega^2)}{[(\beta_1 + \beta_2)^2 + \omega^2][(2\beta_1 + \beta_2)^2 + \omega^2]} \right]. \quad (8)$$

Видно, что в этих случаях в выражении для интегральной кривой (6) возникают интегралы, которые затруднительно выразить в аналитической форме. Поэтому построение интегральной кривой возможно только численно для импульса с конкретными значениями параметров.

В некоторых случаях ЭИПВ может иметь форму косинус-кубического импульса. Такой импульс, расположенный симметрично оси ординат, описывается функцией

$$u(t) = \begin{cases} A \cos^3 \frac{\pi t}{\tau} & -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ 0 & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases}. \quad (9)$$

Для этого импульса известно замкнутое выражение для интегральной кривой распределения энергии в спектре

$$\begin{aligned} \gamma(f) = \frac{1}{10\pi} & \left\{ \frac{[41\pi^2 - 20(\pi f \tau)^2] \pi f \tau}{\left[\frac{\pi^2}{4} - (\pi f \tau)^2 \right] \left[\frac{9}{4} \pi^2 - (\pi f \tau)^2 \right]} \cdot \cos^2 \pi f \tau + \right. \\ & + 9[\text{Si}(\pi + 2\pi f \tau) - \text{Si}(\pi - 2\pi f \tau)] + \text{Si}(3\pi + 2\pi f \tau) - \\ & - \text{Si}(3\pi - 2\pi f \tau) = \frac{9}{2\pi} \left[\ln \left| \frac{\pi + 2\pi f \tau}{\pi - 2\pi f \tau} \right| - \text{Ci}(\pi + 2\pi f \tau) + \right. \\ & \left. \left. + \text{Ci}(\pi - 2\pi f \tau) \right] + \frac{11}{6\pi} \left[\ln \left| \frac{3\pi + 2\pi f \tau}{3\pi - 2\pi f \tau} \right| - \text{Ci}(3\pi + 2\pi f \tau) + \text{Ci}(3\pi - 2\pi f \tau) \right] \right\}. \quad (10) \end{aligned}$$

Как видно, оно содержит неэлементарные функции интегральный синус Si и интегральный косинус Ci. Поэтому использование приведенного выражения также потребует компьютерного расчета при построении графика кривой.

Следовательно, расчеты по спектрально-энергетическому способу вывода условий эквивалентности импульсов отличаются значительной трудоемкостью даже при использовании компьютерных программ.

Можно сделать вывод, что для сравнения импульсов кондуктивных помех, воздействующих на микроэлектронные узлы рецептора, по физическому содержанию подходит интегральный способ вывода условий эквивалентности. Сравнение импульсов, воздействующих на паразитные антенны, требует применения спектрально-энергетического способа, так как его физическое содержание отвечает передаче помехи через паразитную антенну. При этом приходится мириться со значительными трудозатратами на расчет.

Таким образом, существующие способы вывода условий эквивалентности импульсов позволяют решить задачи разработки процедур комплексных испытаний на помехоустойчивость и помехозащищенность и косвенных оценок помехоустойчивости электронных и микропроцессорных технических средств систем управления движением поездов.