

$$P_{\text{с6}} = \int_{W_{\text{пор}}}^{\infty} p(W) dW, \quad (2)$$

где $p(W)$ – плотность вероятности распределения уровней энергии.

Экспериментальное определение уровней энергии помех, рассеиваемой в узлах ТС при разряде статического электричества, затруднительно. Наиболее просто измерять распределение уровней напряжения на источниках ЭСР. Зная распределение уровней напряжения источника, можно найти распределение уровней энергии помех в рецепторе с помощью предложенного в работе А. Орланди, С. Мазетти, З. Флисовского и М. Ярмаркина системного подхода. Системный подход – это процедура получения выходной функции (энергии помех) из входной (напряжение на источнике) посредством функции преобразования. Функцией преобразования является численный или аналитический метод расчета.

Для построения функции преобразования принимаются следующие упрощающие предположения:

- по принципу наихудших условий рассматриваются сечения случайных процессов по неблагоприятным параметрам; таким образом, распределение уровней помех исследуется в зависимости от амплитуды при фиксированных значениях длительности разрядных импульсов;
- поля контактного ЭСР рассматриваются в ближней зоне излучения, где их допустимо считать квазистатическими и рассчитывать методами электростатики при тех же граничных условиях;
- магнитная составляющая полей ЭСР принимается пренебрежимо малой, так как ЭСР характеризуется высокими напряжениями и малыми токами;
- форма импульса напряжения, наведенного в шинах узлов рецептора, повторяет форму разрядного импульса, так как линии связи печатных плат являются согласованными с нагрузкой.

Тогда расчет энергии, рассеиваемой в узлах ТС, производится в три этапа. На первом этапе определяется распределение поверхностной плотности заряда на корпусе ТС путем численного решения системы интегральных уравнений электростатики. На втором этапе методом средних потенциалов вычисляется напряжение, наведенное на шинах узлов ТС. И на последнем этапе отыскиваются значения энергии, рассеиваемой во входных цепях узлов ТС.

Величины вероятности сбоя узлов ТС определяют «слабые с позиций ЭМС места» этого ТС при воздействии ЭСР, что позволяет выбирать точки испытательных воздействий по аналогии с известным в теории надежности методом «вероятность – время», а именно: испытания начинают в точках, расположенных на металлических частях корпусов ТС, щелях, решетках, находящихся близко к узлу, вероятность сбоя которого наибольшая. Затем переходят к следующему узлу, и так продолжается до тех пор, пока не встретится узел с пренебрежимо малой вероятностью сбоя.

Благодаря такому подходу представляется возможным определить на этапе предварительных испытаний «слабые с позиций ЭМС места» данного ТС и производить испытательные воздействия только на точки, близко расположенные к наиболее чувствительным узлам ТС.

УДК 656.25

СПЕЦИФИКА ИСПЫТАНИЙ НА ЭМС СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

К. А. БОЧКОВ, Н. В. РЯЗАНЦЕВА
Белорусский государственный университет транспорта

Решение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) современных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики во многом определяет надежность и безопасность их функционирования. Наиболее неблагоприятными с точки зрения воздействия на аппаратуру являются пачки импульсов помех наносекундной длительности, возникающие при коммутации цепей с индуктивной нагрузкой [1, 2]. Для обеспечения адекватности испытаний к имитаторам пачек импульсов помех следовало бы предъявить требования максимального соответствия реальному процессу коммутации. Однако построение метрологически аттестованных имитаторов помех на реальных источниках проблематично. В настоящее время для обеспечения ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности проводятся испытания их на помехозащищенность аппаратурой моделирования пачек импульсных помех по стандарту IEC 61000-404. Однако испытания, прове-

денные в научно-исследовательской лаборатории, показали, что системы железнодорожной автоматики, выдержавшие тест (например, по 3-й степени жесткости), в реальных условиях эксплуатации имеют частые сбои. Системы обеспечения безопасности, к которым кроме систем железнодорожной автоматики, относятся системы контроля в химической и ядерной отрасли и т.п., должны иметь повышенную надежность. Исходя из требований обеспечения безопасности интенсивность опасных отказов и сбоев для систем железнодорожной автоматики не должна превышать 10^{-11} 1/ч. Проблему обеспечения ЭМС систем ЖАТ усугубляет то обстоятельство, что в реальных условиях на эти системы одновременно действуют несколько видов помех. Для учета этого необходимо проводить многофакторные испытания. Поэтому возникает необходимость разработки новых методов проведения испытаний либо изменения параметров моделируемых помех.

Специалистами по ЭМС уже некоторое время высказываются сомнения в адекватности испытаний на помехозащищенность по стандарту IEC-61000-404 [1, 2]. Существующие способы испытаний в соответствии со стандартом IEC-10004-4 не могут полностью гарантировать того, что проведенное в соответствии со стандартом микроэлектронное устройство не будет иметь сбоев во время эксплуатации. В 2001 году в научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» БелГУТа проводились испытания компьютерной системы ДЦ «Неман». Проведенные исследования позволили установить, что испытания на соответствие требованиям стандарта IEC61000 404 нельзя считать адекватными. На наш взгляд, причина этого не только в особенностях систем железнодорожной автоматики, но и в том, что реальные помехи и пачка IEC имеют существенно разные спектральные характеристики, особенно в высокочастотной области спектра. Реальные помехи в цепях питания СЖАТ, наиболее опасной из которых является пачка импульсов помех, обладают достаточно высокой энергией, их энергетический спектр распределен в широком диапазоне частот вплоть до нескольких сотен мегагерц [1].

Для анализа спектра одиночного импульса стандарта IEC и спектра пачки импульсов необходимо определить аналитическое описание и основные параметры стандартизированного сигнала. Аналитически импульс IEC удобно описать формулой разности двух экспонент, т.к. изменения коэффициенты наклона экспонент, есть возможность наиболее точно подобрать форму сигнала, которая наиболее точно соответствовала бы стандарту МЭК:

$$U(t) = kA(e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}), \quad (1)$$

где A – амплитуда импульса; β_1, β_2 – коэффициенты наклона экспонент; k – коэффициент крутизны,

$$k = \frac{1}{e^{-\gamma_1} - e^{-\gamma_2}}; \gamma_1 = \frac{\ln(\gamma)}{\gamma - 1}; \gamma_2 = \frac{\gamma \ln(\gamma)}{\gamma - 1}; \gamma = \frac{\beta_2}{\beta_1}.$$

Рассчитанные значения β_1 и β_2 составили соответственно 0,01742 и 0,3051.

Используя преобразования Фурье, можно получить спектр пачки таких импульсов:

$$|F(\omega)|^2 = \frac{k^2 A^2 (\beta_2 - \beta_1)^2}{[\beta_1^2 - \omega^2]^2 [\beta_2^2 - \omega^2]^2} \left\{ \omega^4 + \omega^2 (\beta_1^2 + \beta_2^2) + \beta_1^2 \beta_2^2 \right\} \frac{\sin^2 \frac{\omega NT}{2}}{\sin^2 \frac{\omega T}{2}}.$$

Анализ показал, что при $\omega \rightarrow \infty$ функция убывает пропорционально ω^{-4} и имеет провалы в спектре. Кроме того, по мере возрастания количества импульсов в пачке спектр из непрерывного стремится к линейчатому, и лепестки с наибольшей концентрацией энергии становятся все более узкими, а между ними образуются дополнительные зоны с малой концентрацией энергии. Если в процессе испытаний на помехозащищенность "пачкой IEC" окажется, что паразитный канал проникновения помехи будет иметь резонанс в зоне минимума концентрации энергии в пачке, то это не будет выявлено при испытании, изделие будет аттестовано на соответствие стандарту IEC-61000 и тем самым будет совершена ошибка. Сам факт неадекватности испытаний по стандарту IEC 61000 404 уже давно обсуждался специалистами по ЭМС, и для решения этой проблемы в основном предлагаются инженерные интуитивные методы. Такие методы повышения адекватности испытаний основаны на изменении параметров пачки импульсов помех. Так, в [2] предлагается использовать пачку треугольных импульсов с нарастающей длительностью и пачку затухающих синусоид.

Авторами получены и проанализированы аналитические выражения для спектров таких пачек помех. Спектр пачки импульсов треугольной формы описывается выражением

$$|F(\omega)|^2 = k_1^2 \left(1 + \frac{1}{\omega^2} \right) \tau_n^2 \left(\frac{\sin \frac{\omega \tau_n}{2}}{\frac{\omega \tau_n}{2}} \right)^2,$$

где k_1 – угловой коэффициент нарастания импульсов; τ_n – длительность n -го импульса.

Анализ спектра пачки импульсов треугольной формы с нарастающей амплитудой показал, что энергия в спектре будет резко убывать пропорционально ω^{-4} и также имеет провалы в спектре. При этом технически сложно получить треугольные импульсы с крутыми фронтами, что предопределяет еще более резкое уменьшение энергии в спектре с ростом частоты. В [2] также предложено использовать пачки импульсов помех в форме затухающей синусоиды. Спектр такой пачки имеет вид

$$|F(\omega)|^2 = \frac{A^2}{\omega^2} \left\{ \left(1 + \sum_{i=1}^n (-1)^i \cos(\omega \tau_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \sin(\omega \tau_i) \right)^2 \right\}.$$

Выполненный авторами анализ показал, что и в этом случае имеют место те же недостатки. Следовательно, необходимо искать другие способы повышения адекватности испытаний на ЭМС, основанные на приближении энергетических спектров пачек импульсов помех реальным помехам.

Авторами были найдены несколько вариантов комбинации пачек импульсов помех, спектр которых приближался к спектру реальных помех. Однако техническая реализация в большинстве случаев затруднена и неизбежно приведет к значительному удорожанию имитаторов помех. Наиболее приемлемым решением может служить использование пачки сдвоенных импульсов IEC, наложенных друг на друга со сдвигом, т. е. модифицированной пачки [3]. Спектр в этом случае описывается выражением

$$F_1 + F_2 = A \left\{ k_1 \left(\sin \frac{\omega NT_1}{2} \right) \left(\sin \frac{\omega T_1}{2} \right)^{-1} (R_1 \cos \varphi_1 + S_1 \sin \varphi_1) + i(S_1 \cos \varphi_1 - R_1 \sin \varphi_1) + \right. \\ \left. + k_2 \left(\sin \frac{\omega NT_2}{2} \right) \left(\sin \frac{\omega T_2}{2} \right)^{-1} (R_2 \cos \varphi_2 + S_2 \sin \varphi_2) + i(S_2 \cos \varphi_2 - R_2 \sin \varphi_2) \right\},$$

где

$$R_1 = -\frac{\beta_1 e^{-\beta_1 t_1} \cos(\omega t_1) - \beta_1 - w e^{-\beta_1 t_1} \sin(\omega t_1)}{\beta_1^2 + w^2} + \frac{\beta_2 e^{-\beta_2 t_1} \cos(\omega t_1) - \beta_2 - w e^{-\beta_2 t_1} \sin(\omega t_1)}{\beta_2^2 + w^2};$$

$$S_1 = \frac{\beta_1 e^{-\beta_1 t_1} \sin(\omega t_1) + w e^{-\beta_1 t_1} \cos(\omega t_1) - w}{\beta_1^2 + w^2} + \frac{-\beta_2 e^{-\beta_2 t_1} \sin(\omega t_1) - w e^{-\beta_2 t_1} \cos(\omega t_1) + w}{\beta_2^2 + w^2};$$

$$R_2 = -\frac{\alpha_1 e^{-\alpha_1 t_1} \cos(\omega t_1) - \alpha_1 - w e^{-\alpha_1 t_1} \sin(\omega t_1)}{\alpha_1^2 + w^2} + \frac{\alpha_2 e^{-\alpha_2 t_1} \cos(\omega t_1) - \alpha_2 - w e^{-\alpha_2 t_1} \sin(\omega t_1)}{\alpha_2^2 + w^2};$$

$$S_2 = \frac{\alpha_1 e^{-\alpha_1 t_1} \sin(\omega t_1) + w e^{-\alpha_1 t_1} \cos(\omega t_1) - w}{\alpha_1^2 + w^2} + \frac{-\alpha_2 e^{-\alpha_2 t_1} \sin(\omega t_1) - w e^{-\alpha_2 t_1} \cos(\omega t_1) + w}{\alpha_2^2 + w^2};$$

$$\varphi_1 = \frac{\omega NT_1}{2}; \varphi_1 = \frac{\omega}{2} (NT_2 + 2\tau),$$

β_1, β_2 – коэффициенты наклона экспонент в формуле двуэкспоненциального импульса длительностью 50 нс; α_1, α_2 – коэффициенты наклона экспонент в формуле двуэкспоненциального импульса длительностью 82 нс.

Подбирая значения T_1 и T_2 , можно добиться того, что спектр будет почти сплошным, кроме того, спектральная функция убывает пропорционально частоте в первой степени, что является достаточным хорошим результатом.

На основе анализа спектров реального процесса коммутации цепи с индуктивной нагрузкой, пачки "IEC" и предлагаемой модифицированной пачки импульсов можно сделать вывод, что использование такой пачки позволяет повысить адекватность испытаний на помехозащищенность, так как спектр модифицированной пачки ближе к реальному. Кроме того, предлагаемое решение не требует существенного усложнения аппаратуры имитаторов помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Bochkov K. A. Analysis of specifications of international standard IEC - 801 // Proceedings International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Wroclaw, 1992, p. 651-653.
- 2 Eriksson A. Interference Environment for Protection and Control Equipment during normal Operating conditions compared to IEC 1000-4-4 // Proceedings International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC-98 ROMA. Rome, Italy, 1998, p. 276-282.
- 3 Bochkov K. A., Ryazantseva N. V. Adequacy of tests for Noise Immunity with Pulse packages // Proceedings International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Wroclaw, 1996, p. 581-583.

УДК 629.4.024: 681.17

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕГАБАРИТНОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ХОДУ ПОЕЗДА

В. В. БУРЧЕНКОВ

Белорусский государственный университет транспорта

В настоящее время на Белорусской железной дороге эксплуатируются контрольно-габаритные устройства (КГУ) с сигнальной проволокой. Эти устройства устанавливаются перед входными светофорами станции и контролируют проходящий подвижной состав на соответствие габариту приближения строений – габариту С. Срабатывание устройства происходит при обрыве сигнальной проволоки развалившимся грузом или неисправной частью вагонов и свидетельствует об аварийной ситуации в контролируемом составе. Поезд с такой неисправностью в обязательном порядке останавливается на станции для осмотра и поиска негабаритного вагона или вагонов по всему составу с последующим устранением негабаритности. Затраты времени на восстановление оборвавшейся сигнальной проволоки после срабатывания КГУ составляют от трех до восьми часов, в течение этого времени контроль габарита проходящего подвижного состава не производится, что создает предпосылки для аварийной обстановки. В процессе эксплуатации КГУ с сигнальной проволокой отмечены случаи прохода подвижного состава с нарушением габарита через пункт контроля без фиксации этого нарушения, за счет оттягивания сигнального троса. Указанные обстоятельства, а также затраты времени на поиск негабаритного вагона, особенно в ночное время, убедительно доказывают необходимость перехода к электронному бесконтактному способу контроля габарита подвижного состава.

БелГУТом по заказу Белорусской железной дороги разработана система автоматического определения негабаритности подвижного состава на ходу поезда (САОН). Она предназначена для непрерывного бесконтактного сканирования нарушений габарита с помощью излучателей и фотоприемников инфракрасного излучения. При срабатывании САОН, в отличие от срабатывания КГУ с сигнальной проволокой, осуществляется автоматическое определение порядковых номеров любого количества негабаритных вагонов в контролируемом поезде с указанием верхней, левой и правой боковых негабаритностей с индикацией и регистрацией цифровых показаний на станционных устройствах системы ДИСК-Б. При этом определение негабаритности сводится к осмотру вагона, показанного в цифровом сообщении о результатах автоматического контроля поезда.

В августе 2001 года на перегоне Уть–Лисички была установлена габаритная рама для САОН, а в декабре осуществлены монтажные и пусконаладочные работы на этой системе. Исследования работоспособности напольных устройств в условиях неблагоприятной погоды (снег с дождем, иней с морозом и т.д.) выявили необходимость доработки конструкции излучателей инфракрасного диапазона и фотоприемников. Специальные эксперименты были проведены для нижних, наиболее ответственных датчиков. Для них разработана конструкция корпусов типа «двойной чехол», подлежащая патентованию. Из-за имевшихся случаев хищения решалась проблема вандалостойкости. В резуль-