

УДК 621.396

В.Н. БОЙКО, Д.В. ЧУЙКОВ, інженери (Метрологічес. центр військових еталонів, г. Харків)

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Показана актуальность решения задачи обеспечения одновременного и совместного функционирования различного радиотехнического, электронного и электротехнического оборудования – решение задачи электромагнитной совместимости радиотехнических средств. Показано, что проведение испытаний радиотехнических средств на электромагнитную совместимость позволяет повысить степень их устойчивости к помехам. Предложена методика проведения испытаний на электромагнитную совместимость.

Показано актуальність рішення задачі забезпечення одночасного та сумісного функціонування різного радіотехнічного, електронного й електротехнічного обладнання – рішення задачі електромагнітної сумісності радіотехнічних засобів. Показано, що проведення випробувань радіотехнічних засобів на електромагнітну сумісність дозволяє підвищити ступінь їхньої стійкості до перешкод. Запропоновано методику проведення випробувань на електромагнітну сумісність.

Actuality of decision of task of providing of the simultaneous and compatible functioning of different radio engineering, electronic and electrical engineering equipment – decision of task of electromagnetic compatibility of radio engineering facilities is rotined in the article. It is rotined that testing radio engineering facilities on electromagnetic compatibility allows to promote the degree of their firmness to the obstacles. A testing method is offered on electromagnetic compatibility.

Постановка проблемы. Широкое использование различных электротехнических и радиоэлектронных средств приводит к возрастанию уровней электромагнитных полей, созданных ими в окружающем пространстве. Эти поля являются помехами для других подобных устройств, ухудшая условия их функционирования и снижая эффективность применения. Новое направление техники, призванное обеспечить одновременную и совместную работу различного радиотехнического, электронного и электротехнического оборудования, получило название электромагнитной совместимости (ЭМС) радиотехнических средств (РТС). Обеспечение ЭМС РТС относится к одной из наиболее актуальных проблем современной техники, так как процесс развития электротехники, электроэнергетики, радиоэлектроники и средств телекоммуникаций усиливает зависимость результатов применения новых средств от условий их одновременного и совместного функционирования.

Таким образом, исследование условий обеспечения ЭМС РТС при их одновременном функционировании является актуальной проблемой.

Анализ литературы. Анализ литературы по проблемам электромагнитной совместимости технических средств и аппаратуры телекоммуникационных сетей показал, что обеспечение ЭМС достигается следующим образом, в соответствии с работами [1-6]:

– созданием необходимого уровня помехоустойчивости РТС, что позволяет применять средства в некоторой абстрактной «усредненной» электромагнитной обстановке, типичной для рассматриваемого класса объектов. Соответственно возникает необходимость в нормировании как видов, так и амплитуды помех, способных воздействовать на ТС. Дополнительно нормируются процедуры проверки соответствия ТС требованиям устойчивости к помехам. Понятно, что для применения на реальных объектах должна выбираться только аппаратура, удовлетворяющая требованиям помехоустойчивости действующих стандартов;

– определением электромагнитной обстановки (ЭМО) на данном конкретном элементе (объекте) РТС. В реальности, ЭМО на объекте может сильно отличаться от «усредненной» ЭМО, принимаемой

© В.Н. БОЙКО, Д.В. ЧУЙКОВ, 2015

в стандартах ЭМС. Иначе и не может быть, поскольку на ЭМО влияет множество факторов – от особенностей проекта данной конкретной РТС до грозовой активности в регионе, грунтовых условий. Необходима стандартизация методик оценки ЭМО на существующих объектах (преимущественно экспериментальными методами).

Отдельно следует отметить стандартизацию в части ограничения эмиссии помех оборудованием. В настоящее время существуют нормы в части ограничения эмиссии помех, создаваемых электронными устройствами (в первую очередь в интересах предотвращения загрязнения радиочастотного спектра). Естественно, возникает идея ограничить аналогичным образом эмиссию помех силовым оборудованием – скажем, выключателями и разъединителями. Проблема, однако, заключается в том, что уровень помех РТС определяется не столько особенностями тех или иных средств электро-радиоаппаратуры, сколько их взаимодействием в рамках единой системы.

Целью статьи является разработка методики испытаний на электромагнитную совместимость элементов радиотехнических средств.

Основная часть. Выделим основные электромагнитные помехи, на устойчивость к которым должны испытываться РТС:

- микросекундные импульсные помехи большой энергии, возникающие при молниевых разрядах;

- кондуктивные помехи в полосе частот от 0 до 150 кГц, представляющие собой общие несимметричные напряжения, возникающие, например, как следствие протекания тока короткого замыкания через заземляющее устройство;

- колебательные затухающие помехи, возникающие при коммутационных операциях высоковольтными электроаппаратами;

- магнитное поле промышленной частоты, возникающее как при штатной работе объектов (постоянно действующее поле), так и при коротком замыкании (кратковременное поле);

- импульсное магнитное поле, возникающее при молниевых разрядах;

- наносекундные импульсные помехи, возникающие при коммутационных операциях как низковольтного оборудования, так и быстродействующих высоковольтных аппаратов;

- радиочастотное электромагнитное поле, возникающее как при штатной работе средств радиосвязи, так и при работе другой аппаратуры;

- кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями;

- динамические изменения напряжения электропитания;

- пульсации напряжения электропитания постоянного тока;

- электростатические разряды.

Кроме того, есть требования ЭМС к источникам питания постоянным и переменным током для устройств телемеханики и требования, определяющие нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. Хотя они не устанавливают требований к аппаратуре, эти стандарты должны учитываться при оценке ЭМО на объектах.

В указанных требованиях определяются вид помехи, ее характеристики, уровни в зависимости от класса жесткости испытаний на помехоустойчивость аппаратуры. Далее описываются методы проведения испытаний и даются критерии, по которым интерпретируются результаты этих испытаний.

Рассмотрим предложенную методику испытаний РТС на ЭМС, которая основывается на обеспечении необходимого уровня помехоустойчивости радиотехнических средств.

Представим части РТС в виде двух последовательно соединенных элементов a_1 и a_2 . Функция преобразования испытательного сигнала на этом участке равна $y = k_1 k_2 x$, где x и y – значения испытательного сигнала на входе и выходе, k_1 и k_2 – коэффициенты преобразования сигнала в элементах a_1 и a_2 . Относительное изменение испытательного сигнала на этом участке из-за нестабильности работы элементов a_1 и a_2 составит

$$\xi_{\Sigma} = \frac{\Delta y}{y} = \frac{1}{y} \left[\frac{\partial y}{\partial k_1} \Delta k_1 + \frac{\partial y}{\partial k_2} \Delta k_2 \right] = \xi_1 + \xi_2, \quad (1)$$

где $\xi_i = \frac{\Delta k_i}{k_i}$, $i = 1, 2$ – относительная нестабильность элемента a_i .

По определению интенсивность дрейфа является условным математическим ожиданием скорости дрейфа $\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2$ при условии, что $\xi_{\Sigma} = \xi$. Так как математическое ожидание суммы случайных величин всегда равно сумме их математических ожиданий, то на основании (1) запишем:

$$\mu_{\Sigma}(t, \xi) = \mu_{\Sigma,1}(t, \xi) + \mu_{\Sigma,2}(t, \xi), \quad (2)$$

где $\mu_{\Sigma}(t, \xi)$ – условное математическое ожидание скорости дрейфа ξ_i при условии, что $\xi_{\Sigma} = \xi$.

Условие $\xi_{\Sigma} = \xi$ выполняется при всех $\xi_1 = \xi - \eta$, $\xi_2 = \eta$, $\eta \in (-\infty, \infty)$.

Поэтому с выражения (2) получим:

$$\mu_{\Sigma,1}(t, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_1(t, \xi - \eta, \eta) \varphi_{i,2}(\eta / \xi) d\eta, \quad (3)$$

где $\mu_1(t, \xi - \eta, \eta)$ – условное математическое ожидание скорости дрейфа ξ_1 при условии, что $\xi_{\Sigma} = \xi$ и $\xi_1 = \xi - \eta$.

Аналогично

$$\mu_{\Sigma,2}(t, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_2(t, \xi - \eta, \eta) \varphi_{i,1}(\eta / \xi) d\eta.$$

При параболической интенсивности дрейфа характеристик имеем:

$$\begin{aligned} \mu_i(t, \xi - \eta) = & m'_i(t) + r_{i,1}(t) [\xi - \eta - m_i(t)] + \\ & + r_{2,i}(t) \{ [\xi - \eta - m_i(t)]^2 - \gamma_i(t) \delta_i(t) [\xi - \eta - m_i(t)] - \delta_i^2(t) \} \end{aligned}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \mu_{\Sigma,1}(t, \xi) = & \{ m'_1(t) + r_{1,1}(t) [\xi - m_1(t)] + \\ & + r_{2,1}(t) \{ [\xi - m_1(t)]^2 - \gamma_1(t) \delta_1(t) [\xi - m_1(t)] - \delta_1^2(t) \} \} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{i,2}(\eta / \xi) d\eta - \\ & - [r_{1,1}(t) + r_{2,1}(t) \{ 2(\xi - m_1(t)) - \gamma_1(t) \delta_1(t) \}] \int_{-\infty}^{\infty} \eta \varphi_{i,2}(\eta / \xi) d\eta + \\ & + r_{2,1}(t) \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2 \varphi_{i,2}(\eta / \xi) d\eta. \end{aligned}$$

Вычислим интегралы, содержащиеся в этом выражении. Очевидно, что

$$A_1(t, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{i,2}(\eta / \xi) d\eta = 1, \quad A_2(t, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta \varphi_{i,2}(\eta / \xi) d\eta,$$

является условным математическим ожиданием ξ_2 в момент t при условии, что $\xi_{\Sigma} = \xi$, т.е. среднеквадратической регрессией ξ_2 на ξ . Считая эту регрессию линейной, получим:

$$A_2(t, \xi) = m_2(t) + \rho_{2,\Sigma}(t) \frac{\delta_2(t)}{\delta_{\Sigma}(t)} [\xi - m_1(t) - m_2(t)],$$

где $\delta_{\Sigma}(t)$ – среднеквадратическое отклонение ξ_{Σ} в момент t ; $\rho_{2,\Sigma}$ – коэффициент корреляции ξ_2 и ξ_{Σ} в момент t .

Учтем, что коэффициент корреляции величин ξ_2 и ξ_{Σ} равен:

$$K(\xi_2, \xi_{\Sigma}) = M[\xi_2(\xi_1 + \xi_2)] = M[\xi_2^2] + M[\xi_1, \xi_2] = \delta_2^2(t),$$

так как ξ_1 и ξ_2 взаимно независимы ($\xi_i = \xi_i - m_i(t)$, M – знак математического ожидания). Поэтому

$$\rho_{2,\Sigma}(t) = \frac{K(\xi_2, \xi_{\Sigma})}{\delta_2(t) \delta_{\Sigma}(t)} = \frac{\delta_2(t)}{\delta_{\Sigma}(t)}$$

$$\text{и } A_2(t, \xi) = m_2(t) + \frac{\delta_2^2(t)}{\delta_{\Sigma}^2(t)} [\xi - m_1(t) - m_2(t)].$$

Далее, для второго начального момента условного распределения запишем:

$$A_3(t, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2 \varphi_{i,2}(\eta / \xi) d\eta = D_2(t / \xi) + A_2^2(t, \xi),$$

где, условная дисперсия:

$$D_2(t / \xi) = \delta_2^2(t) [1 - \rho_{2,\Sigma}^2(t)] = \frac{\delta_1^2(t) \delta_2^2(t)}{\delta_{\Sigma}^2(t)}, \quad (4)$$

так как для независимых величин ξ_1 и ξ_2 можно записать: $\delta_{\Sigma}^2(t) = \delta_1^2(t) + \delta_2^2(t)$

Поэтому с формулы (4) имеем:

$$\begin{aligned} A_3(t, \xi) = & \frac{\delta_1^2(t) \delta_2^2(t)}{\delta_{\Sigma}^2(t)} + m_2^2(t) + \\ & + 2m_2(t) \frac{\delta_2^2(t)}{\delta_{\Sigma}^2(t)} [\xi - m_1(t) - m_2(t)] + \\ & + \frac{\delta_2^4(t)}{\delta_{\Sigma}^2(t)} [\xi - m_1(t) - m_2(t)]^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив полученные выражения (4) и (5) в (3), после преобразований запишем:

$$\begin{aligned} \mu_{\Sigma,1}(t, \xi) = & + m_1'(t) + r_{1,1}(t) \frac{\delta_1^2(t)}{\delta_{\Sigma}^2(t)} [\xi - m_1(t) - m_2(t)] + \\ & + r_{2,1}(t) \frac{\delta_1^4(t)}{\delta_{\Sigma}^4(t)} [\xi - m_1(t) - m_2(t)]^2 - \\ & - \gamma(t) \delta_1(t) \left(\xi - m_1(t) - m_2(t) - \frac{\delta_1^2(t)}{\delta_{\Sigma}^2(t)} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

а $\mu_{\Sigma,2}(t, \xi)$ определяется аналогичным образом.

Таким образом, предложенная методика оценки электромагнитной совместимости РТС, представленная выражениями (1) – (6) и основанная на обеспечении необходимого уровня помехоустойчивости элементов (объектов) РТС, показывает, что совместимость зависит от правильности работы их отдельных элементов, и все возможные негативные последствия воспринимаются системой в виде определенных помех. Данная методика позволяет определить основные методы борьбы с теми или иными помехами, что обеспечит необходимый уровень помехозащищенности элементов РТС.

Выводы

Для обеспечения бесперебойной и безаварийной работы электротехники, электроэнергетики, радиоэлектроники и средств телекоммуникаций

необходимо своевременно проводить испытания этих средств на электромагнитную совместимость.

Исследование предложенного варианта испытания на электромагнитную совместимость радиотехнических систем показало, что интенсивность дрейфа параметров системы подчиняется тем же закономерностям, что и интенсивности дрейфа ее составных элементов. Параметры интенсивности дрейфа системы выражаются через параметры интенсивности дрейфа ее элементов в соответствии с правилами суммирования моментов распределений. Предложенная методика позволяет определить основные факторы, влияющие на обеспечение необходимого уровня электромагнитной совместимости.

Список литературы

1. *Седелников Ю.Е.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учеб. пособ. / Ю.Е. Седелников. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2006. – 304 с.
2. *Цицикян Г.Н.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособ. / Г.Н. Цицикян. – Санкт-Петербург: Изд-во СЗТУ, 2006. – 59 с.
3. *Маслов О.Н.* Электромагнитная безопасность радиоэлектронных средств / О.Н. Маслов. – М.: Связь и бизнес, 2000. – 84 с.
4. *Князев А.Д.* Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоприемных средств / А.Д. Князев. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
5. *Веселовский К.* Системы подвижной радиосвязи / К. Веселовский; пер. с польск. И.Д. Рудинского; под ред. А.И. Ледовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.